

HELMUT LINDNER



Weite Welt
des **S**CHALLS



HELMUT LINDNER
WEITE WELT DES SCHALLS

E R L E B T E W E L T · B A N D 4 0

HELMUT LINDNER

Weite Welt des Schalls

Mit 6 Tafeln und Federzeichnungen

von Erich Fischer

JUGENDBUCHVERLAG ERNST WUNDERLICH

Lizenz Nummer 359 — 425/3/55

1.—10. Tausend (1. TA: 5000)

Alle Rechte durch den Verlag vorbehalten

Satz und Druck in Borsig Excelsior

VEB Graphische Werkstätten Leipzig

I N H A L T

Einleitung	7
Die Glocke	9
Die Mechanik des Hörens	13
Ein Ton und seine Handschrift	19
Der Klang in der Retorte	24
Altes und Neues vom Grammophon	31
Natürliche und künstliche Stimmen	38
Die Schallgeschwindigkeit	47
Der Schall als Welle	53
Die Geometrie des Schalls	59
Schatzgräber Schall	69
Pythagoras und die Tonleiter	76
Durchbruch zur wahren Harmonie	83
Von der Mundharmonika zum wohltemperierten Klavier	87
Piano und Forte – objektiv betrachtet	95
Was ist ein Phon?	101
Der singende Kristall	110
Lautloser Schall	116
Das Geheimnis der Fledermaus	122
Stichwortverzeichnis	129

EINLEITUNG

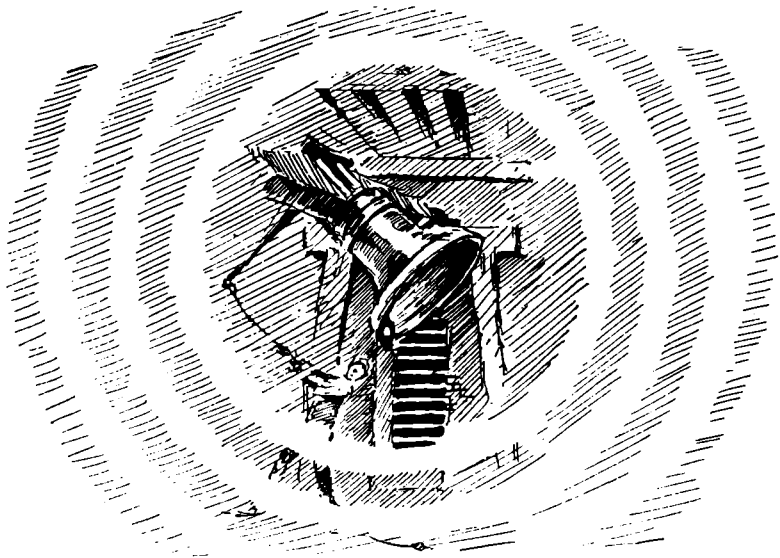
Die Welt, in der wir leben, ist die Welt unserer Sinne. Ein ergiebiger Teil dessen, was sich außerhalb unseres Körpers in fortwährender Veränderung der Formen und Zustände abspielt, dringt durch die Kanäle unserer Sinnesorgane ins Bewußtsein. Tag für Tag, ein ganzes Menschenleben lang, flutet dieser Strom in die Zentren unseres Nervensystems, hält es wach, regt es zu eifriger eigener Tätigkeit an, hinterläßt seine Spuren im Gedächtnis.

Einen bedeutenden Teil aller Eindrücke empfangen wir mit dem Ohr, dessen große Reichweite und erstaunliche Empfindlichkeit bis an die Grenze des physikalisch überhaupt Möglichen geht. Es erschließt uns einen unerhörten Reichtum von Empfindungen, der weite Bereiche unseres kulturellen Lebens erfüllt. Es ist die Welt des Schalls, zugleich die des gesprochenen Wortes und der Musik.

Rein physikalisch und unbesehen dessen, was sich alles damit anfangen läßt, ist der Schall nichts weiter als eine schwingende Bewegung, die sich in allen elastischen Medien wellenförmig ausbreitet. Nichts weiter als dies? Für einen toten Steinblock vielleicht, nicht aber für das verwöhnte und empfindsame Nervenbündel, zu dem sich der moderne Kulturmensch entwickelt hat.

Er schluckt den Schall tagaus, tagein, bewußt und unbewußt in Form von Signalen, Kommandos und Nebengeräuschen. Ein großer Teil seines Denkapparates wird von den „Sprache“ genannten Schallzeichen anderer Menschen gesteuert. Er genießt den Schall im Konzertsaal und im Kino; ganze Industrien leben davon, Schall kunstgerecht, bequem und in immer neuer Form für den Hausgebrauch zu liefern. Nur wenn es dem Nervenbündel gar zu bunt wird, flüchtet es auf ein paar Tage im Jahr in die stille Natur, wo ausnahmsweise einmal keine Motoren dröhnen oder Lautsprecher brüllen.

Abgesehen aber von alledem hat die Wissenschaft den Wirkungsbereich des Schalls auf Gebiete ausgedehnt, die nicht für unser Ohr bestimmt sind. Für die Technik ist er zu einem wichtigen und vielseitigen Werkzeug geworden. Über die Formen und Gesetze des Schalls ließe sich noch viel mehr sagen, als dieses Büchlein sich vorgenommen hat, aber es soll kein vollständiges Lehrbuch sein, sondern nur ein kleiner Reiseführer durch die weite Welt des Schalls. Alte und neue Probleme werden wir dabei anrühren und auch unverzagt an schwierigere Fragen der Akustik herangehen. Denn wie bei so vielen anderen Dingen liegt des Wunderbaren genug oft im scheinbar Einfachsten. Doch will es recht verstanden sein, und wer es ernsthaft zu erkennen sich bemüht, hat es noch nie umsonst getan.



DIE GLOCKE

Zu Ende ist der Tag, vorbei die Unrast und das lärmende Getriebe der kleinen Stadt. Still geworden sind die Straßen. Die Spannung eines arbeitsreichen Tages ist gelöst, und weit öffnen sich die Sinne der milden Ruhe eines Sommerabends. Unnatürlich groß erhebt sich der Mond, Bäume und Giebel werden zu Silhouetten. Ein Brunnen plätschert, von der Ecke herüber dringen halblaute Stimmen eines verspäteten Gespräches. Langsam verhallen die Schläge der Turmuhr. Immer leiser schwebt der letzte, volle Ton

dahin und verliert sich in der friedlichen Stille. Abgekehrt von den Sorgen des Alltags, wenden sich die Gedanken nach innen. Sie suchen nicht mehr nach Zweck, sondern nach Sinn, drängen nicht mehr nach Wirkung, sondern spüren dem Ursächlichen nach. Das Denken endet im Grübeln nach den Gründen.

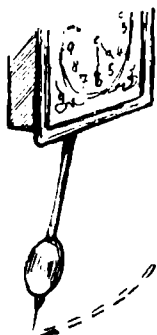
Was war es? Als die Glocke zur Ruhe mahnte, schlug ein Hammer gegen ihren bronzenen Rand. Der kreisrunde Mund zuckte, sich zu einer Ellipse formend, unter dem Schlag zusammen. Sich elastisch ausweitend, wollte er wieder zum Kreise werden. Doch die Trägheit der schweren Masse ließ ihn zu einer neuen Ellipse auseinanderschnellen. Von hier aus schwang er abermals zurück, und viele Sekunden noch zitterte die Erschütterung in dem metallenen Körper nach.

Die Glocke hängt aber nicht im leeren Raum. Luft erfüllt ihr Inneres und umschmiegt ihren Mantel. Die ganze Umgebung wird von der schwingenden Bewegung mit erfaßt, die Erschütterung dringt hinaus ins Freie und verbreitet sich in weitem Umkreis; denn die Luft hat hier keine Grenze.

Ganz nüchtern betrachtet, ist die tönende Glocke ein Klangerzeuger wie viele andere. Die verwirrende Vielfalt der schallaussendenden Instrumente und Apparate soll uns aber nicht ängstlich machen. Es kommt uns jetzt wenig darauf an, wie sie äußerlich aussehen mögen. Ob Glocke, Saite oder Orgelpfeife, maßgebend für die Entstehung des Schalls sind und bleiben allein die Schwingungen als solche.

Schwingungen? Unser Blick fällt auf das Pendel einer Wanduhr. Im vollkommenen Gleichmaß eilt es geschäftig hin und her, Sekunde um Sekunde. Es schneidet den Strom der dahinhuschenden Zeit säu-

berlich in haargenau' gleiche Stücke. Unwillkürlich zählen wir mit: eins-zwei, eins-zwei . . ., doch halt, wir müssen erst etwas miteinander vereinbaren! Jedesmal, wenn das Pendel nach links oder rechts ausschlägt, hört man ein leises Ticken; die volle Schwingung ist aber erst dann zu Ende, wenn es wieder am Ausgangspunkt angekommen ist. Einmal hin und zurück, das nennt man eine Schwingung. Früher sprach man einmal von „Doppelschwingungen“ und meinte damit in Wirklichkeit zwei halbe.



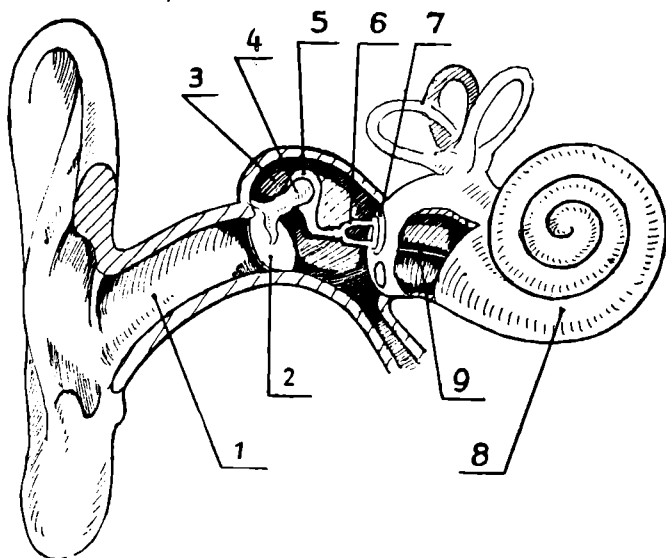
Die Ursache des Schalls sind Schwingungen. Da sie meist sehr rasch verlaufen, zählt man stets, wieviel in einer Sekunde stattfinden und nennt dies die „Frequenz“. Man sagt dann kurz und bündig, die Frequenz betrage soundso viele „Hertz“. Im Verlaufe einer Schwingung aber mag sich ereignen was da wolle, nach ihrem Ablauf muß jedenfalls der Ausgangszustand wiederhergestellt sein. Der vom Hammer getroffene Glockenrand biegt sich zuerst nach innen, dann nach außen und wieder zurück zur anfänglichen Form. Dann erst beginnt die nächste „Periode“.

So schlägt die Glocke Stunde um Stunde, regelmäßig gesetzte Wegsteine am dahinrinnenden Fluß der Zeit. Wenn sie ihre Stimme erhebt, spricht sie in Schwingungen, dazu bestimmt, menschliche Ohren zu erreichen. Während das Uhrpendel eine Schwingung vollendet, vibriert der Glockenrand viele hundertmal. Einmal am Tage dreht sich der Erdball um seine eigene Achse und läßt die Sonne auf- und untergehen. Gäbe es nicht solche regelmäßig sich wiederholenden Vorgänge, wir hätten kein Mittel, die Zeit einzuteilen und zu messen. Hilflos stünden wir inmitten des unaufhörlichen Naturgeschehens, erbarmungslos mit ihm davongerissen. Ohne Zeitmaß lebten wir nur dem Augenblick, dumpf und tierhaft flösse unser Leben dahin. Die Glocke erinnert uns daran, daß wir Menschen sind. Dem Umstand, daß es Schwingungen gibt, verdanken wir eine der menschlichsten Seiten unseres Daseins.



DIE MECHANIK DES HÖRENS

Zur Wahrnehmung des Schalls steht uns ein gut entwickeltes Gehör zur Verfügung. Es ist ein überaus zarter, auf kleinstem Raum zusammengedrängter Mechanismus, komplizierter und empfindlicher als das kostbarste Mikrophon.



Das Ohr: 1) Gehörgang, 2) Trommelfell, 3) Mittelohr,
4) Hammer, 5) Amboß, 6) Steigbügel, 7) ovales Fenster,
8) Schnecke, 9) Trennwand.

Der Apparat unseres Ohres besteht aus drei hintereinanderliegenden Kammern. Die äußerste ist der Gehörgang; er schließt mit dem Trommelfell ab. Hinter diesem, im „Mittelohr“, hängen drei gelenkig verbundene Knöchelchen, Hammer, Amboß und Steigbügel genannt. Sie übertragen die Bewegung des Trommelfells auf eine zweite Membran, die als „ovales Fenster“ den Abschluß der zweiten Kammer bildet. Dahinter liegt der kostbarste Teil, das „innere Ohr“. Er hat die Gestalt eines flachen Schneckenhauses und ist mit Flüssigkeit gefüllt. Eine zarte Trennwand durchzieht ihn der Länge nach. Am Anfang ist diese etwa 3 cm lange „Basilarmembran“ nur sehr schmal, wird aber gegen das Ende hin immer breiter. Dem äußeren Bild nach könnte man sie mit einer winzigen Harfe vergleichen. Ihre Oberfläche ist quergestreift, von feinen Fasern überdeckt, den Enden der Hörnerven. Sie nehmen die Schwingungen auf und leiten sie dem Gehirn zu. Hier vollzieht sich der Vorgang des eigentlichen Hörens, werden die mechanisch entstandenen Schwingungen umgewandelt in Nervenreize, in eine abgestufte Skala von Empfindungen übersetzt. Die physikalische Erscheinung der Schwingungen, mathematisch in Zahlen erfassbar, läßt sich bis an den Beginn des Nervensystems verfolgen. Was dann folgt, sind Zustände des empfindenden Bewußtseins.

Sie äußern sich beim Hörvorgang als hohe und tiefe Töne. Ganz niedrige Frequenzen empfinden wir noch als einzelne aufeinanderfolgende Stöße, die immer schneller werdend in ein tiefes Brummen übergehen. Bei etwa 16 Hz liegt diese „untere Hörgrenze“. Man kann darüber streiten, ob es nicht besser sei, sie erst mit 20 Hz anzugeben. Mit zunehmender Frequenz

steigt die Tonhöhe an und erreicht bei etwa 20 000 Hz ihr äußerstes Ende. Auch hierüber sind die Meinungen geteilt, zumal die „obere Hörgrenze“ individuell verschieden ist.

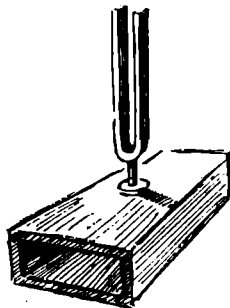
Sie geht übrigens mit zunehmendem Lebensalter zurück. Ende der Vierziger hört man nur noch bis 13 000 Hz. Bei so hohen Frequenzen ist es mit einer ausgesprochenen Tonempfindung ohnehin nicht mehr weit her. Sie verliert sich in einem scharfen s-artigen Laut und verschwindet dann ganz. Gegenüber noch höheren Schwingungszahlen sind wir taub. Ein Mangel ist das durchaus nicht, denn fast alle in der Natur vorkommenden Laute und Geräusche bewegen sich in diesem Gebiet zwischen 16 und 20 000 Hz.

Jenseits des „Hörschalls“ geht es aber weiter. Weshalb soll es auch keine Schwingungen von 30 000, 50 000 und 100 000 Hz geben? Damit betreten wir aber das geheimnisvolle Reich des Ultraschalls, über das wir uns später noch unterhalten wollen.

Damit die Schwingungen weithin hörbar werden, müssen sie eine größere Luftmenge erfassen. Die schmalen Zinken einer Stimmgabel sind dazu nur schlecht geeignet. Selbst nach starkem Anschlagen muß man sie noch ans Ohr halten. Aber man weiß sich zu helfen. Die Gabel wird auf ein Holzkästchen gesetzt, das nur an einer schmalen Seite offen ist, und laut hallt ihr Ton alsbald durchs ganze Zimmer. Nicht irgendein beliebiges Kästchen darf es sein. So unscheinbar es aussieht, ist es doch sehr überlegt angefertigt. Nimmt man es zur Hand und bläst flach über den Rand der Öffnung hinweg, so vernimmt man — wenn auch ein wenig dumpf und unrein — genau den Ton der Stimmgabel. Die vom hölzernen

Gehäuse umschlossene Luftsäule hat die gleiche Eigenfrequenz wie sie. Nur dann wird die Luft zum kräftigen Mitschwingen angeregt. „Resonanz“ nennt man diesen Vorgang.

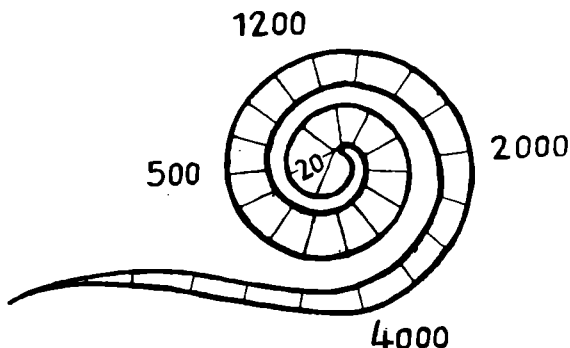
Ohne Resonanzboden wäre auch der Klang einer Violsaite kaum vernehmbar. Sie ist so dünn, daß sie keine größere Luftmenge zu bewegen vermag. Ihre abstrahlende Fläche ist viel zu klein. So wird ein Steg daruntergeklemmt, der die Schwingungen auf die Decke des Geigenkörpers überträgt. Hier beginnt die



Aufgabe des Geigenbauers, diesem wichtigsten Teil des Instrumentes unter Verwendung ausgesuchter Hölzer und Lacke die richtige Beschaffenheit zu geben. Mit Berechnung und Mathematik ist da wenig ausgerichtet. Span um Span hebt die kundige Hand des Meisters aus dem massiven Holz. Am Ende erlangt die kunstvolle Wölbung des Resonanzbodens jene Gestalt, die dem Saitenklang erst Kraft und Seele verleiht.

An einen solchen Resonanzvorgang dachte auch Hermann von Helmholtz, als er mit seiner „Lehre von den Tonempfindungen“ die erste wissenschaftlich be-

gründete Theorie des Hörens entwickelte. Er betrachtete die auf der Basilarmembran sichtbaren Nervenenden, aufgespannt wie die Saiten eines Klaviers, Tausende feinsten Fäserchen von zunehmender Länge, ein jedes von ihnen könnte offenbar mit einer bestimmten Frequenz schwingen. Ein von außen eindringender Ton wird dann die Faser zum Mitschwingen veranlassen, deren Eigenfrequenz mit der des



Schema der Basilarmembran mit Angabe der Frequenzen, die an den einzelnen Stellen wahrgenommen werden.

Tones übereinstimmt. In der unmittelbaren Nähe des ovalen Fensters liegen die kürzesten Fasern, dort entstehen die hohen Töne. Dem abgekehrten Ende, wo die Membran breit ausläuft, sind die tiefen Töne zugeordnet.

So einleuchtend und naheliegend die einfache Resonanztheorie sein mochte, so muß sie doch heute in einiger Hinsicht verbessert werden. Die Basilarmembran ist ein durchaus weiches und gallertartiges Gebilde und vermag daher keine straffgespannten Saiten zu tragen. Auch beansprucht jeder Resonanzvor-

gang eine gewisse Zeit, bis sich die Schwingungen zu genügender Stärke aufgeschaukelt haben. Die Erfahrung zeigt aber, daß zum richtigen Erkennen eines Tones schon Impulse von wenigen tausendstel Sekunden Dauer genügen. Diese „Tonkennzeit“ ist viel zu kurz, um eine frei schwingende Saite — und als solche wären ja die Nervenfasern aufzufassen — in Resonanz treten zu lassen. Durch direkte Beobachtung im Mikroskop konnte vielmehr erwiesen werden, daß jeder einzelne Ton die Membran selbst mit-schwingen läßt. Nicht eine einzelne Faser schwingt, sondern ein kleines Stück der Basilarmembran tritt in Resonanz, was dann auch eine viel kürzere Einschwingzeit verlangt. Dann werden die auf diesem Abschnitt liegenden Fasern zwangsläufig mitbewegt, am stärksten dort, wo die Erregung der Membran am kräftigsten ist. Im übrigen bleibt es bei der Helmholtzschen Ansicht, daß die hohen Töne fensternah und die tiefen fensterfern empfunden werden. Damit erweist sich der edelste Teil unseres Gehörs als das Spiegelbild einer Violine. Dort übertragen sich die von der Hand des Künstlers erzeugten Saitenschwingungen auf den Resonanzboden, um dann in den Raum hinauszustrahlen. Im Ohr wird der Resonanzboden zuerst erfaßt und in Bewegung gesetzt. Tausende feiner Fasern tasten wie zarte Finger die Stellen stärkster Erregung ab und formen sie wieder in Klangbilder um. Vom Notenblatt zur Empfindung führt eine Kette kunstvoller Mechanismen. Resonanz schließt ihre Glieder zusammen. Resonanz vereint den Komponisten mit seiner zuhörenden Gemeinde.

EIN TON UND SEINE HANDSCHRIFT

Die Zahl der einem Musiker zur Verfügung stehenden Töne scheint demnach unübersehbar groß zu sein. Der Frequenzbereich einer Orgel erstreckt sich von 16 bis 8276 Hz, der eines Klaviers von 27 bis 3480 Hz. Etwa 2000 Töne kann das Ohr unterscheiden. Aber das Klavier hat nur 85 Tasten! Nur einer ausgewählten Reihe von Tönen ist der Zutritt zur kunstgerechten Musik gestattet. Sie ist in der Schrift unserer Noten niedergelegt und allgemein bekannt. Es ist die Tonleiter.

Das umstehend wiedergegebene Bild ist die Tastatur eines modernen Klaviers. Jeder Ton trägt zur Kennzeichnung einen Buchstaben, jeder hat seine bestimmte Frequenz. Wenn ein einziger Ton dieser Reihe gegeben ist, lassen sich alle anderen danach stimmen. Die Höhe dieses Mustertones muß daher nach einer besonderen Vorschrift festgelegt sein; am besten so, daß ihn jeder Musiker gleichsam in der Westentasche bei sich tragen kann. Hierfür ist der Ton a^1 ausersehen, der sich mit einer fingergroßen Stimmgabel bequem erzeugen läßt.

In früheren Zeiten hat man sich darüber keine besonderen Gedanken gemacht. Unter einem Dutzend Dudelsäcken ließen sich meist ein paar herausfinden, die halbwegs zusammenpaßten. Die Fiedeln mochten sich danach einrichten. Bei einer Laute wurde die

	1046,5	c^2
	987,8	h^2
ais, b	880,0	a^2
gis, as	784,0	g^2
fis, ges	698,5	f^2
	659,3	e^2
dis, es	587,3	d^2
cis, des	523,3	c^2
	493,9	h^1
ais, b	440	a^1
gis, as	392,0	g^1
fis, ges	349,2	f^1
	329,6	e^1
dis, es	293,7	d^1
cis, des	261,6	c^1
	246,9	h
ais, b	220,0	a
gis, as	196,0	g
fis, ges	174,6	f
	164,8	e
dis, es	146,8	d
	130,8	c
	123,4	H

oberste Saite einfach so stramm gezogen, daß sie eben nicht zerriß. Dann war sie richtig gestimmt. So lautete diese wahrlich dehnbare Gebrauchsanweisung um 1500:

„Erstlich die auff dem g muß so hoch stan
Wie sie es ungerissen leiden kan.
Zeuch die auff dem g so hoch du magest
Das sie nicht zureist, wann du sie schlagest.“



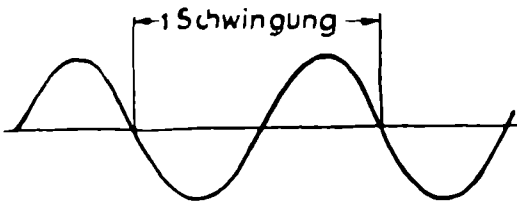
Nicht viel besser war es um die Orgeln bestellt. Das a^1 einer 1361 vollendeten Domorgel wurde zu 506 Hz gemessen, bei anderen lag es um 370 Hz. Da sich die Komponisten um die in den einzelnen Städten und Ländern üblichen Gepflogenheiten herzlich wenig kümmerten, hatten die Organisten eine recht hohe Kunstfertigkeit zu entwickeln. Aus dem Stegreif transponierend mußten sie ihr Spiel der Tonhöhe

eines Sängers anpassen. Überhaupt war der in der Kirchenmusik übliche „Chorton“ um ein beträchtliches höher als der für kleinere Instrumentalgruppen verwandte „Kammerton“. So manche noch erhalten gebliebene herrliche Orgel ist deshalb heute im großen Orchester zum Schweigen verurteilt.

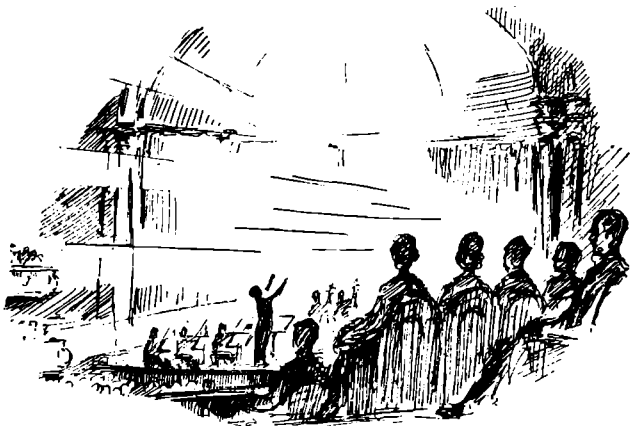
In der Pariser Oper fanden sich zwei Stimmgabeln mit 426,5 und 434 Hz. 1857 benutzte man am gleichen Ort 448 Hz. Ähnlich war es überall. Um dieser Unordnung Einhalt zu gebieten, wurde 1859 der Pariser Kammerton a^1 mit 435 Hz eingeführt und später als „Wiener Kammerton“ auch für die übrigen Länder. Dem Drängen gewichtiger musikalischer Kreise nachgebend, setzte man endlich 1939 den „Normstimmton“ a^1 mit 440 Hz fest. Er ist nicht etwa neu, sondern war schon von der Deutschen Naturforschertagung in Stuttgart 1834 als „Deutsche Stimmung“ angenommen worden. Ob es endgültig dabei bleiben wird?

Töne lassen sich auf die verschiedenste Weise sichtbar machen. Dazu bedarf es gar keiner besonderen Hilfsmittel. Wir nehmen eine Stimmgabel zur Hand, schlagen sie an und fahren mit der Zinke schnell über eine berußte Glasplatte. Gegen das Licht betrachtet, zeigt sich, daß die schwingende Gabel eine feine, wellenförmige Spur hinterlassen hat, eine vollkommen regelmäßige Wellenlinie.

Der Mathematiker nennt sie eine „Sinuskurve“, die Grundfigur des einfachsten Schwingungsvorganges. Wenn man sie zeichnen will, darf man aber keinen Zirkel verwenden, es sind keine Halbkreise! Die gleiche Erscheinung können wir nicht nur bei der Stimmgabel beobachten, sie ist ja nichts weiter als ein zusammengebogener Stahlstab, der an einem Ende angeschlagen vermöge seiner Federkraft hin und her



zittert. Alle anderen elastischen Gegenstände zeigen dasselbe Bewegungsgesetz. Die schweren Federn eines D-Zug-Wagens, die Polsterung einer Matratze, das wippende Sprungbrett, sie alle schwingen sinusförmig. Die Schriftspur des einfachen reinen Tones zeigt das Urbild aller einfachen Schwingungen überhaupt.



DER KLANG IN DER RETORTE

Gedämpftes Flüstern noch aus dem Publikum, die Flügeltüren der Philharmonie haben sich soeben geschlossen. Von der in strahlendes Licht getauchten Bühne herab klingt noch ein letztes Mal das von der Oboe angegebene a^1 , einige letzte probierende Bogenstriche der Geiger, da und dort noch ein kleiner Druck am Wirbel. Der Dirigent besteigt das Podium, klopft ans Notenpult. Gebieterisch heben sich beide Arme.

Ein Augenblick gespannter Stille, und dann brechen die ersten machtvollen Tonfolgen von Beethovens Fünfter in die atemlos lauschende Menge. Ein Mei-

sterwerk von bezwingender Gewalt, ohne Zierat und Schnörkel rüttelt auch den Gleichgültigsten wach. Das im kraftvollen Einsatz gegebene Motiv klingt immer wieder durch, bald in monumentalen Akkorden, bald in majestätischer Melodie und im jagenden Allegro. Dann wie nach einem letzten Atemholen des Unsterblichen fallen im Fortissimo und wie in Granit gehämmert die Schlußakkorde. Vollendet ist das Werk, rauschender Beifall, Entspannung, Aufatmen. Man spürt, wie das der Welt entrückte Bewußtsein der Menge sich wieder dem Irdischen zuwendet. In der Vorhalle trifft man sich wieder. Schweigend und noch nicht ganz mit sich im Gleichgewicht die einen, in angeregter Unterhaltung die anderen, Kenner und Laien.

„Ist doch eigentlich wunderbar, wie so etwas überhaupt möglich ist.“ — „Wie meinen Sie, bitte?“ — „Nun, wie dieses einfache Thema, an sich so — ich darf wohl sagen — anspruchslos, schlicht, in so ergreifende Formen gebracht werden kann.“ — „Ja, mir scheint das immer als die eigentliche Tat des Genius, das im Unbewußten Schlummernde so darzustellen, daß es allen verständlich werde. Das Mittel — hier ein einfaches Motiv — erfährt dann von innen her eine fortwährende Umgestaltung. Die Form, nicht um ihrer selbst willen zu betrachten, ist doch nur Mittel zum Zweck.“ — „Richtig, richtig, aber ich meinte eigentlich etwas anderes. Wie — gewissermaßen technisch — diese Verschiedenheit der Klangbilder zustande kommt. Sehen Sie, eine ganz einfache Tonfolge erweckt mehr oder weniger umgeformt, immer neue Eindrücke, klingt immer wieder anders.“ — „Ja, man hat das Gefühl einer sich stetig wandelnden Farbgebung. Sobald die Vio-

linen das Thema von den Hörnern übernehmen oder dann wieder die Oboe, wechselt das Klangbild und damit der Gefühlsinhalt.“ — „Das ist es, was mir vorschwebte. Die Klangfarbe ist in der Musik sicher das, was dem Maler das Kolorit bedeutet.“ — „Ganz Ihrer Meinung! Übrigens habe ich da vor langem eine interessante Abhandlung gelesen, eine Gegenüberstellung von optischer und akustischer Farbgebung...“

Wir wollen das Gespräch nicht länger belauschen. Fragen der Klangfarbe haben ihre musikästhetische Seite, aber auch ihre physikalische. Violine und Oboe, Klavier und Posaune, sie alle können wohl einen und denselben Ton erzeugen, rein und einwandfrei, gleichsam „aufs Hertz genau“. Auf dem Notenblatt steht ein und dasselbe Zeichen, und doch klingt es auf jedem Instrument völlig anders. Der Grund hierfür ist, daß es sich gar nicht um sinusförmige einfache „Töne“, sondern vielmehr um „Klänge“ handelt.

Obwohl es von anderen Gelehrten schon früher vermutet wurde, konnte es erst von Helmholtz experimentell bewiesen werden, daß jeder von einem Instrument hervorgebrachte Klang zusammengesetzter Natur ist und aus einem „Grundton“ sowie einer Reihe mehr oder weniger stark hervortretender „Obertöne“ besteht. Diese sind aber nicht von irgendeinem Zufall zusammengemischt, sondern nach einem strengen Gesetz miteinander verbunden. Obertöne sind stets ganzzahlige Vielfache der Frequenz des Grundtones. Wir können uns leicht davon überzeugen.

Schlagen wir den Klavierton a an, so erklingt nicht nur der Grundton mit seinen 220 Schwingungen,

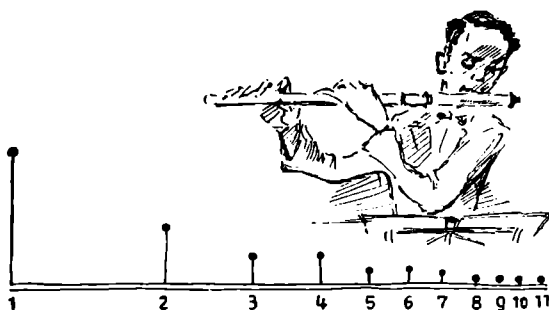
sondern dieselbe Saite erzeugt zugleich noch weitere Töne von 440, 660, 880 . . . Hz. Auf unserer Tonleiter ersehen wir, daß es die Töne a^1 , e^2 , a^2 , cis^3 . . . sind. Ein ganzes Tongemisch strömt uns entgegen, eben ein Klang. Helmholtz meinte selbst: „Jeder einzelne Partialton existiert also ebenso gut und in demselben Sinne in dem Klange, den ein einzelnes musikalisches Instrument hervorbringt, wie z. B. in dem weißen Licht, was von der Sonne oder irgendeinem glühenden Körper ausgeht, die verschiedenen Farben des Regenbogens existieren.“

Obertöne mitzuhören und herauszufinden, ist Übungssache. Man drücke die Taste a^1 auf dem Klavier herunter, ohne daß der Hammer die Saite berührt, daß aber der Dämpfer die Saite freigibt. Dann schlage man kurz den tieferen Ton a an, worauf die a^1 -Saite laut und deutlich weitertönt. Sie ist mit dem ersten Oberton der angeschlagenen Saite in Resonanz getreten und hat einen Teil ihrer Energie übernommen. Ebenso lassen sich der Ton e^2 , a^2 und noch weitere zum Mitschwingen bringen. Schließlich gelangt man auch bald dazu, die Obertöne unmittelbar herauszuhören, wenn man seine Aufmerksamkeit darauf konzentriert. Helmholtz steigerte seine Fertigkeit darin so weit, daß er bis 16 Obertöne ohne jedes Hilfsmittel aus einem Klang herausfinden konnte.

Das genügte ihm aber nicht, er wollte auch wissen, in welchem relativem Anteil jeder einzelne Oberton an der gesamten Klangmasse beteiligt ist. Hierzu ließ er sich eine Serie von hohlen Messingkugeln aufsteigender Größe herstellen. Jede Hohlkugel hatte zwei gegenüberliegende Öffnungen, die größere hielt er gegen das zu untersuchende Instrument, die kleinere,

trichterförmig zugespitzte steckte er ins Ohr. Ein solcher Hohlraumresonator verstärkt von allen Tönen, die auf ihn eindringen, nur den einen, welcher der Eigenfrequenz der Kugel entspricht und der dafür mit wunderbarer Kraft erklingt. Die relative Stärke der aus dem Klang ermittelten Teiltöne ließ sich daran zugleich recht gut abschätzen.

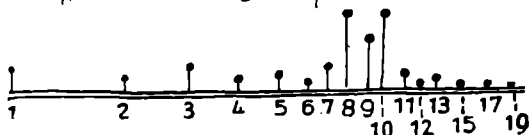
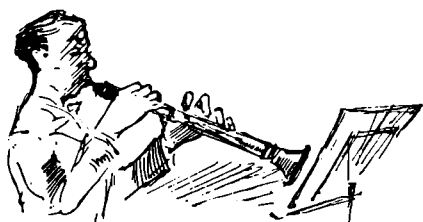
Was als individuelle Klangfarbe eines Instrumentes erscheint, ist nichts weiter als die Art und Weise, in welchen Verhältnissen die einzelnen Obertöne mit dem Grundton vermählt sind. Klar und übersichtlich



tritt das im sogenannten „Klangspektrum“ in Erscheinung. Der volle, weiche Klang einer Flöte hat seine Ursache in dem stark ausgeprägten Grundton, dem sich die Obertöne mit rasch abnehmender Stärke unterordnen. Der ein wenig näselnde Gesang der Oboe erscheint gegenüber der Flöte kerniger und gehaltvoller. Neben dem nur angedeuteten Grundton liegen $\frac{2}{3}$ der Gesamtenergie im dritten und vierten Oberton. Rau und scharf dagegen klingt die Klarinette. Ihr Grundton ist ebenfalls nur schwach, dafür

fällt mehr als die Hälfte der Gesamtenergie auf den 7. bis 10. Oberton.

Was ist überhaupt ein reiner Ton ohne seine höheren Begleiter? Er klingt hohl und inhaltlos, wie die auf den Resonanzkasten gestellte Stimmgabel. Der strahlend helle Klang alter Meistergeigen liegt an der besonders starken Resonanz im Gebiet zwischen 3000 und 5000 Hz. Billige elektrische Musikapparate geben diese hohen Frequenzen nur schlecht wieder, der schwebend singende Ton der Violine wird flach und leer. Auch die großen gedackten Orgelpfeifen geben



bei schwachem Anblasen nur matte und düstere Töne. Ihnen fehlt mit den Obertönen der musikalische Reiz. Die Orgelbauer pflegten daher diese matten Klänge durch besondere Mixturregister zu verbessern, indem sie durch Hinzunahme weiterer Pfeifen die fehlenden Obertöne künstlich hinzufügten.

Obertöne reichen aber noch nicht hin, uns die Verschiedenheit der Klangbilder zu erklären. Einen ganz einfachen und eindrucksvollen Versuch dazu kann

jeder anstellen, der eines der verbreiteten Tonbandgeräte besitzt. Man kann nämlich spaßeshalber die Aufnahme eines Klavierstückes auch rückwärts ablaufen lassen. Zunächst macht diese kleine musikalische Ketzerei einen überaus lustigen Eindruck. Ein Unbeteiligter käme kaum auf den Gedanken, daß es sich um ein Klavier handeln könnte. Seltsam schweben die Töne an und reißen unvermittelt ab und erinnern eher an abgehacktes Harmoniumspiel. Was geht hier vor sich? Daß die umgestülpte Melodie nicht mehr stimmt, liegt auf der Hand. Doch die innere Zusammensetzung der Klänge kann sich unmöglich geändert haben, sowohl was die einzelnen Akkorde als auch den spektralen Aufbau der Klänge betrifft. Grund- und Obertöne bleiben im gleichen Verhältnis gemischt. Aber die Ein- und Ausschwingvorgänge sind geändert, und sie sind es, die das Klangbild ausschlaggebend formen helfen. Für den Klavierton ist typisch, daß er im Augenblick des Anschlages plötzlich einsetzt und hernach immer leiser werdend abklingt. Diese beiden Vorgänge sind beim verkehrt laufenden Tonband vertauscht, und das ändert den Klangcharakter von Grund aus. Es ist wieder ähnlich wie in der Malerei, wo nicht die Farbe allein, sondern erst die richtige Abstufung und sinnvolle Umgrenzung der Farben das Bild ausmachen.

ALTES UND NEUES VOM GRAMMOPHON

Verklungen und verschollen sind Klänge und Laute vergangener Zeiten. Der Schall ist allzu flüchtig, nirgendwo läßt er einen sichtbaren Eindruck zurück, aus dessen Spuren er sich rekonstruieren ließe. Wohl sind Schriftzeichen und Bilder früherer Epochen erhalten geblieben, doch der Klang ihrer Stimmen und Instrumente ist uns für immer verloren. Nur spärliche Anhaltspunkte sind da und dort vorhanden, aus denen sich etwas über Aussprache und Tonfall oder über die Art des Musizierens erschließen läßt.

Heute ist das anders. Schallplatte, Tonband und Tonfilm halten gesprochene Worte und jede Art von Musik für alle Zeiten fest. Heute schon können wir Menschen sprechen und singen hören, die längst in ihren Gräbern ruhen. Je nach Lust und Laune lassen wir uns von weltberühmten Tenören und Orchestern unterhalten, zu Hause, im Walde, im Paddelboot.

Wie ist das möglich? Als wir das Abbild des einfachen Tones unter die Lupe nahmen, fanden wir eine Sinuskurve. Wer neugierig ist, wird nun weiter fragen, wie denn wohl das Bild eines Klanges anschauen möge, in dem viele Teilschwingungen enthalten sind oder eine Aufzeichnung der menschlichen Stimme. Freilich geht es nicht an, eine Violin-saite mit der berußten Glasplatte zu berühren. Doch läßt sich eine Vorrichtung ersinnen, die den Klang

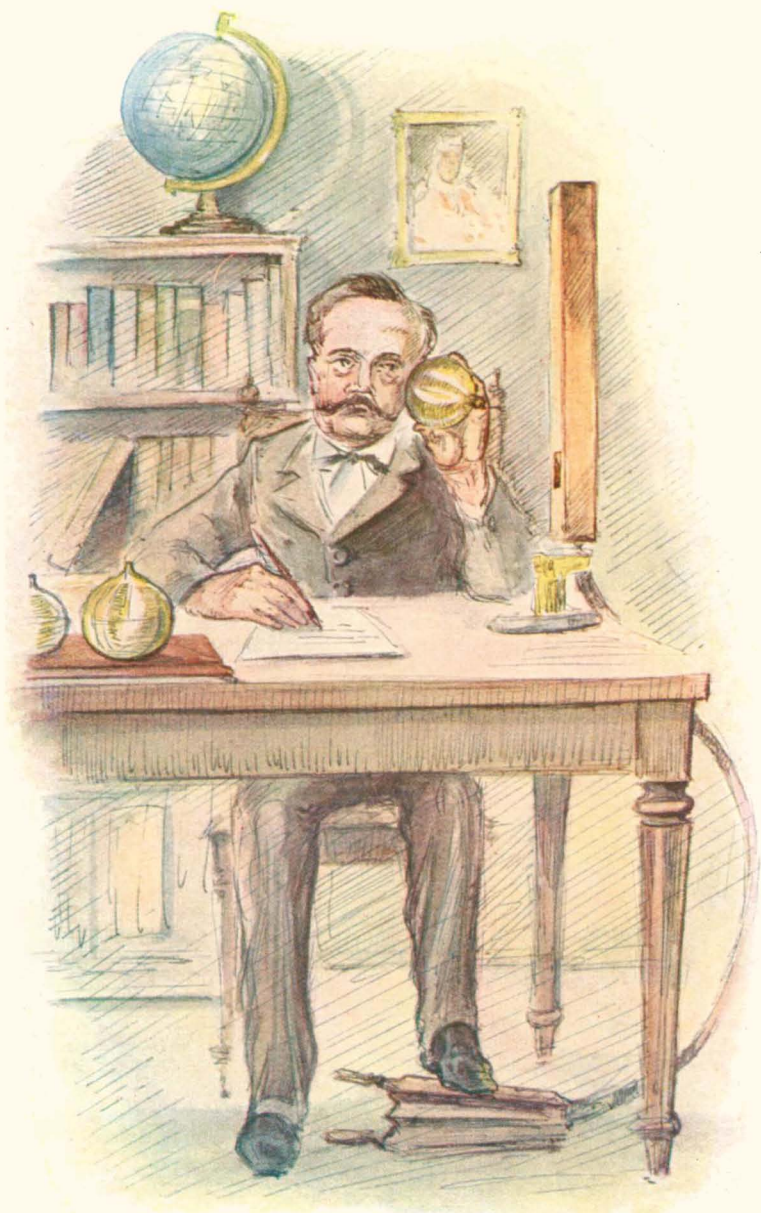
auf indirektem Wege aufzeichnet. Man spannt in einen kleinen Schalltrichter eine Membran, an der eine Schreibspitze befestigt ist. Schallschwingungen setzen die Membran in Bewegung, und der Stift hinterläßt auf einer darunter hinweggeführten Unterlage eine Spur. Unter dem Vergrößerungsglas erblickt man wieder eine Wellenlinie. Sie hat nicht die



regelmäßige und wohlgefällige Form der Sinuskurve; sie verläuft regellos, mehr oder weniger gezackt, an- und abschwellend. Es kommt auch darauf an, ob man die berußte Platte langsam oder schnell unter dem Stift vorbeizieht; je nachdem ergeben sich eng beisammenliegende Zacken oder sanft dahinschwingende Wellenlinien. Das ist die Handschrift des Schalls; aber sie ist nichts für Laien. Nur Sachverständige können sie deuten.

Mittelalterliche Orgel





So weit war der Stand der Dinge um 1859, als der Engländer Scott sein „Phonautoskop“ baute. Eine Schweinsborste zeichnete die Schwingungen auf einen Zylinder, den man mit der Hand drehen mußte. Der Franzose Charles Cros unterbreitete 1877 der Akademie der Wissenschaften zu Paris den Vorschlag, die Aufzeichnungen der Schweinsborste durch Photographie auf eine Metallplatte zu übertragen und dort einzugravieren. Ein an der Membran angebrachter Stift müßte dann in der Rille gleitend die ursprünglichen Laute wieder hervorrufen. Doch weder Cros selbst noch andere besaßen den nötigen Unternehmungsgeist, die Sache wenigstens einmal auszuprobieren.

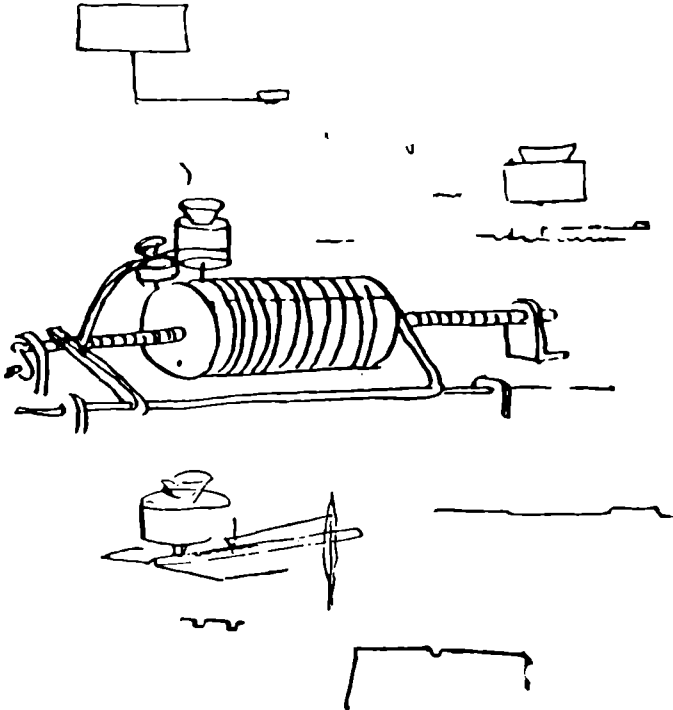
Es hat viele unglückliche Erfinder gegeben, die ihrer Zeit weit vorausseilend an technischen oder menschlichen Unzulänglichkeiten scheiterten. Beim Phonographen war es umgekehrt. Die wissenschaftlichen und technischen Voraussetzungen zu seiner Verwirklichung lagen längst bereit. Aber niemand fand sich, der den verlockenden Gedanken aufgegriffen hätte, Sprache und Klänge einzufangen und mechanisch wiederzugeben. Das Problem mag technisch allzu schwierig erschienen sein.

Der Zufall war es, der 1877 dem geschäftstüchtigen Edison einen glücklichen Gedanken sozusagen versehentlich in den Schoß warf. Edison war dabei, etwas ganz anderes zu bauen, nämlich einen Apparat, der Morsezeichen in einen Papierstreifen eindrückte, die dann auf einen anderen Stromkreis übertragen werden sollten. Das besorgte ein Stift, der auf dem

Helmholtz bei der Untersuchung einer Orgelpfeife

eingepägten Telegramm entlanglitt und dabei einen elektrischen Kontakt betätigte.

Wie es dann weiter kam, berichtete er selbst: „Hierbei fand ich, daß, wenn der Zylinder mit dem mit



Skizze Edisons' für den Phonographen.

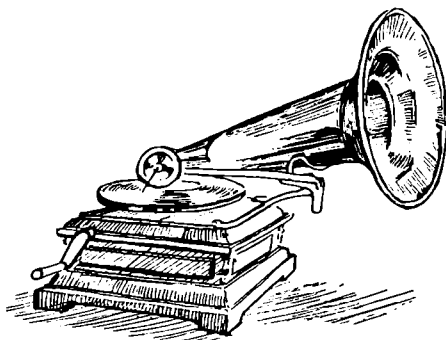
Vertiefungen versehenen Papierstreifen schnell gedreht wurde, durch diese Vertiefungen und Erhöhungen ein summendes Geräusch entstand, ein musikalisch rhythmischer Ton, einem undeutlich gehörten Gespräch vergleichbar. Dies brachte mich

darauf, eine Membran an der Maschine anzubringen, die die Schwingungen oder Klangwellen meiner Stimme, wenn ich in den Apparat sprach, aufnehmen sollte, um sie auf ein auf dem Zylinder angebrachtes eindrucksfähiges Material zu übertragen.“ Nach einer flüchtig hingeworfenen Skizze hat dann sein Mechaniker John Krusei den Apparat gebaut. Dreißig Stunden ununterbrochener Arbeit waren nötig, und der erste „Phonograph“ der Welt war fix und fertig. Er sah noch recht roh und ungeschickt aus. Technisch betrachtet, konnte er gut und gern schon im 17. Jahrhundert gebaut worden sein. Die Walze des solchermaßen zu spät Geborenen war mit gewöhnlichem Stanniol belegt und mußte mit der Hand gedreht werden. „Die Eindrücke auf dem Zylinder, wenn er schnell bewegt wurde, wiederholten die ursprünglichen Worte, die aufgenommen wurden, gerade als ob die Maschine selbst spräche. Ich sah sofort, daß die Aufgabe, die menschliche Sprache so aufzuzeichnen, damit gelöst war; man konnte sie auf mechanischem Wege, so oft man wollte, wiederholen.“

Was dann folgte, waren nur noch Verbesserungen im Rahmen des einmal aufgefundenen Prinzips. Vor allem wurde die Walze bald von der flachen Schallplatte verdrängt. Das bedeutete nicht nur eine äußerliche Änderung der Form, sondern ein grundsätzlich anderes Arbeiten. Beim Phonographen drückt der Stift die Schwingungen der Membran als „Tiefenschrift“ in die Walze. Berliner stellte 1888 seine Membran senkrecht zu der Platte, die sich darunter drehte. Ein Stift an der Membran gräbt auf dieser Platte eine seitlich ausschwingende Wellenlinie in Spiralform von außen nach innen ein, also eine

„Seitenschrift“. Mit der Lupe läßt sich die Spur gut erkennen. Die neue Form der Sprechmaschine wurde „Grammophon“ genannt. Sie verbreitete sich rasch in der ganzen Welt. 1939 schätzte man die Zahl aller vorhandenen Apparate auf 38 Millionen Stück. Sogar der Dalai Lama hat seine Verwendung empfohlen, nämlich als Gebetsmühle.

Die Spielzeit einer normalen Platte von 30 cm Durchmesser beträgt $5\frac{1}{2}$ Minuten. Mehr läßt sich nicht darauf unterbringen, weil die Tonrillen einen ge-



wissen Mindestabstand voneinander haben müssen. Es ist ja zu bedenken, daß der schreibende Stift im Fortissimo seitlich sehr weit ausweicht. Würde man die Rillen enger zusammendrücken, dann kann die Nadel in die vorher durchlaufene Spur zurückgleiten und im dauernden Kreislauf darin verbleiben. Um trotzdem eine längere Spielzeit herauszuholen, hat man daher die „Kleinstrille“ erfunden. Die abspielende Nadel muß dann besonders fein und hart sein. Am besten eignen sich Saphirstifte. Bei einem Plattendurchmesser von 30 cm erhält man jetzt eine

Laufzeit bis zu 20 Minuten. Doch sind hierzu besondere Abspielgeräte notwendig, weil solche Platten viel langsamer rotieren als gewöhnliche.

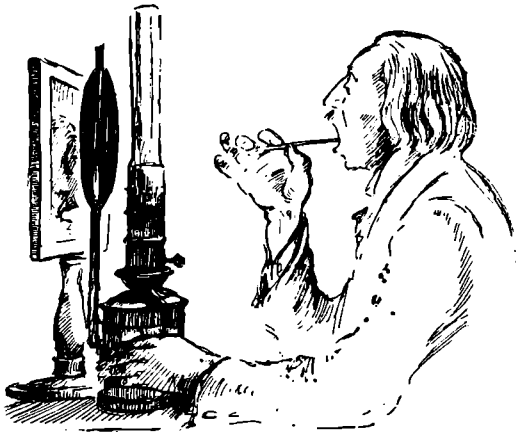
Eine andere Verbesserung geht davon aus, den ungenutzten Raum zwischen den Tonrillen besser zu verwerten. Einerseits zur Aufnahme der Fortissimostellen notwendig, wird er nur ab und zu beansprucht. Es handelt sich daher um die Aufgabe, die Rillen nicht in gleichbleibenden Abständen zu schneiden, sondern die Nadel während der Aufnahme nach dem Grundsatz sparsamsten Platzbedarfes zu lenken. Die Abstände sollen nirgendwo größer sein als unbedingt nötig. Das ergibt die sogenannte „Füllschrift“. Die Aufnahmeapparatur ist sehr kompliziert. Der die Tonspur zeichnende Stichel muß seinen Abstand nach der zuletzt gezogenen Nachbarrille richten und außerdem noch seine eigenen Auslenkungen berücksichtigen. Das alles besorgt ein umfangreiches Steuergerät mit nicht weniger als 56 Röhren. Aber der Gewinn ist mit 7 bis 9 Minuten Spieldauer beträchtlich, und die Platte ist auf jedem gewöhnlichen Apparat zu verwenden. 95 Prozent aller gangbaren Musikstücke dauern ohnehin weniger als 9 Minuten.

NATÜRLICHE UND KÜNSTLICHE STIMMEN

Der vornehmste aller Klangerzeuger ist die menschliche Stimme. Ihre Ausdrucks- und Wandlungsfähigkeit wird von keinem Instrument erreicht. Die menschliche Stimme kunstgerecht zu schulen und zu höchsten Leistungen zu entwickeln, war auch des berühmten Gesangspädagogen Manuel Garcia Lebensaufgabe. Große und weltbekannte Künstler waren aus seiner Lehre hervorgegangen. Seine Fähigkeiten waren anerkannt, seine Autorität unbestritten. Doch in seinen Mußestunden verfolgte ihn ein quälender Gedanke: das eigentliche Werkzeug seiner Kunst, das tief in der Kehle verborgene Organ, dem all seine Bemühungen galten, war ihm trotz allem unerreichbar fremd geblieben. Noch keines Menschen Auge hatte es lebend erblickt.

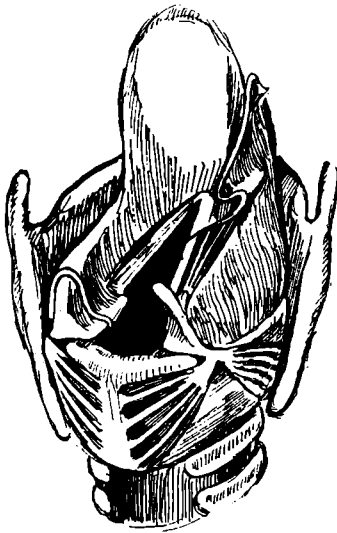
Eines Tages, im Jahre 1855, saß er in seinem Studierzimmer. Vor sich eine stark leuchtende Petroleumlampe, sah er unverwandt in einen Spiegel. In der Rechten hielt er einen langen gekrümmten Stiel, an dem ein rundes Spiegelchen befestigt war. Er führte es immer wieder tief in die Mundhöhle hinein, bog den Halter zurecht, wischte mit einem Tuch den feuchten Hauch des Atems von der blinkenden Fläche. Endlich — seine Miene verriet zunehmende Erregung — gelang es ihm, das Licht der Lampe in

die Kehle hinabzulenken und zugleich das Spiegelbild aufzufangen. Noch ein paarmal rückte er die Leuchte hin und her, damit er den Ellenbogen besser stützen konnte; denn seine Hand zitterte vor innerer Erregung. Was noch nie einem Sterblichen zu sehen vergönnt war, lag da vor seinen Augen. Der Schein der Lampe warf zitternde Reflexe auf ein weiches Doppelpolster, von feuchter Schleimhaut glatt über-



zogen. In seiner Mitte klaffte ein dunkler Spalt, der sich bebend öffnete und schloß. Die Königin aller Instrumente, nicht die im prächtigen Gewand thronende Orgel war es — nein hier lebte sie anspruchslos und bescheiden in der dunklen Tiefe seiner Kehle. Ihre Entdeckung war einem Würdigen zuteil geworden. Bald darauf verlieh die Universität zu Königsberg dem Meister des Gesanges und Erfinder des Kehlkopfspiegels den Titel eines Ehrendoktors der Medizin.

Wie sieht nun der Kehlkopf aus? Unter dem glatten Überzug liegen zu beiden Seiten der Stimmritze zwei Muskelbündel, die Stimmbänder. Jedes ist mit dem vorderen Ende an einem von andern Muskeln bewegten „Stellknorpel“ befestigt, so daß sich Öffnungsweite und Spannung der Stimmbänder nach Belieben verändern läßt. Weniger als der anatomi-



sche Bau interessiert uns die physikalische Wirkung des Kehlkopfes. Er ist eine „Polsterpfeife“. Ein vom Brustkorb her gesteuerter Luftstrom wird durch die zunächst aneinanderliegenden Stimmbänder gepreßt. Dem Druck nachgebend, öffnen sie sich, werden von der elastischen Kraft der Muskulatur wieder zusammengeführt, öffnen sich abermals, und so wiederholt sich das Spiel in rascher Folge. Die Schwingungs-

zahl richtet sich nach der Muskelspannung. Die Tonhöhe wird nach dem gleichen Prinzip geregelt wie bei den mit Wirbeln gespannten Saiten einer Violine; die Tonerzeugung geht aber vor sich wie bei einer Trompete. Der Kehlkopf ist ein Blasinstrument, in dem zwei Saiten schwingen. Ein unvergleichliches Instrument, wie es die Technik noch nicht konstruiert hat, vereinigt in sich den schmetternden Klang einer Trompete mit dem schwebenden Gesang einer Geige. In seiner Verstellbarkeit ist es so vielseitig, daß es in der Abstufung der Klangfarben ein ganzes Dutzend Musikinstrumente ersetzt.

Man bedenke doch die akustische Leistung dieses Organs, kaum grösser als einer der Wirbel am Hals der Violine! Der Sänger da oben auf der Bühne nimmt es mit dem ganzen Orchester auf. Hier bedienen hundert geschäftige Hände fünfzig Instrumente, Geigen, Celli und Bässe, Flöten, Hörner und wer weiß noch was. Über all dieses Stimmgewirr schmettert der Tenor seine Arie hinweg, und bis in die fernsten Winkel des Riesenraums dringt der sieghafte Gesang eines kleinen Gebildes, das man bequem in die Westentasche stecken könnte. Sein Klang überstrahlt den ganzen Aufwand des großen Orchesters und zieht in seinem fortgesetzten Wechsel des Ausdrucks und Charakters seiner Stimme die Ohren der Zuhörer in seinen Bann — Zauber der Stimme!

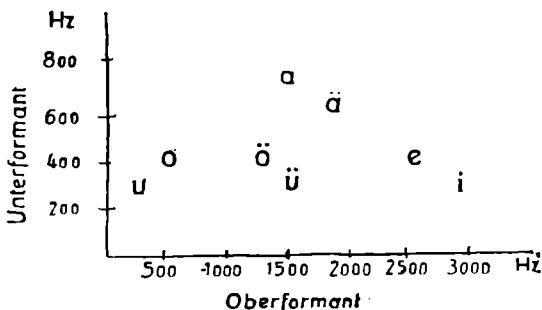
Doch ist der Kehlkopf nur das Organ der Stimme und nicht das der Sprache. Er kann singen wie eine Geige, aber zum Sprechen reicht er nicht aus. Wie jedes Musikinstrument erzeugt er einen Klang mit einem Grundton und seinen Obertönen. Gewiß, er kann seine Tonhöhe verändern; aber wie entstehen nun die Vokale a, e, i, o und u und die mannigfachen

Konsonanten, die stimmhaften und stimmlosen Reibe-, Verschuß- und Zitterlaute? Man darf sich nicht täuschen lassen, die 26 Buchstaben des Alphabets geben ja nur eine sehr begrenzte Auswahl, nur ein ganz rohes Schema wieder. Fast jede der über tausend lebenden Sprachen hat ihre Besonderheiten; jeder Dialekt ist an der ihm eigentümlichen Färbung der Vokale und Aussprache der Konsonanten zu erkennen.

Wenden wir uns den Vokalen zu! Der einfache vom Kehlkopf gelieferte Klang muß in bestimmter Weise umgestaltet werden. Auf seinem Weg bis zu den geöffneten Lippen dringt er durch die Rachen- und Mundhöhle und regt auch die in den Nasenhöhlen enthaltene Luft zum Mitschwingen an. So kommt es, daß gewisse Bereiche der in den Obertönen enthaltenen Frequenzen durch Resonanz verstärkt, andere wieder unterdrückt werden. Es kommen keine neuen Töne hinzu, aber ihre relative Stärke zueinander wird neu geordnet. Aus dem vom Kehlkopf gelieferten Rohmaterial wird erst das individuelle Klangbild des Vokals geformt. Je nach der Stellung des Gaumensegels, der Muskulatur des Rachenraumes und der Lage der Zunge nehmen die vokalgestaltenden Hohlräume die verschiedensten Formen an. Ohne Zahl ist die Mannigfaltigkeit der Möglichkeiten; es mag hoffnungslos erscheinen, ein System hineinzubringen.

Und es gelingt doch! Jeder Vokal nämlich — und das enthüllen gründliche Klanganalysen — wird von zwei Frequenzgebieten geformt, die man „Formanten“ nennt. Wohlgermerkt, es sind nicht bestimmte Einzelfrequenzen, sondern mehr oder weniger breite Ausschnitte aus der langen Serie der jeden Grundton

begleitenden Obertöne. An welcher Stelle der Obertonreihe die Frequenzgruppe liegt, das hängt von der augenblicklichen Einstellung des gesamten Sprechapparates ab. Das wichtigste aber ist: den Grundton mag man nach Belieben verändern, man kann einen Vokal hoch oder tief singen, die Formanten eines bestimmten Vokals liegen fest! Sprechen wir zum Beispiel das Wort „schön“ aus, so liegt der „Oberformant“ des ö bei 1400 und der „Unterformant“ bei 450 Hz, und es ist ganz gleichgültig, ob Mann, ob Frau oder Kind dieses Wort singen, spre-



chen oder flüstern, die Formanten sind immer dieselben.

Ein interessantes und übersichtliches Bild entsteht, wenn man alle Vokale nach ihren Formanten ordnet. Sie lassen sich dann im sogenannten „Vokaldreieck“ unterbringen, einem Schema von so großer Allgemeingültigkeit, daß jeder überhaupt mögliche Vokal darin seinen bestimmten Platz findet und die jeweiligen Formanten sich leicht ablesen lassen. Von dem betreffenden Vokal ausgehend, fährt man mit dem Zeigefinger nach dem linken Rand des Diagramms,

wo die Unterformanten stehen. Fährt man senkrecht nach unten, so stößt man auf die Frequenz des Unterformanten, genauer auf seinen Schwerpunkt; denn es handelt sich, wie gesagt, um Frequenzgebiete. Auf unserm Bild sind natürlich durchaus nicht alle Vokale eingetragen, die es gibt, nur eine kleine Auswahl. Zwischen den angegebenen liegt die Fülle der Zwischenlaute.

Etwas Merkwürdiges tritt ein, wenn die Frequenz des Grundtones höher liegt als die des Formanten. Eine Sängerin kann sich dann noch so große Mühe geben, auf dem hohen a^2 vermag sie kein u oder o zu singen. Es wird günstigstenfalls ein a daraus. Der Kehlkopf erzeugt hierbei einen Grundton von 880 Hz, Unter- und Oberformanten dieser beiden Vokale liegen aber weit darunter, das zu formende Material fehlt!

Der entgegengesetzte Fall tritt ein, wenn kein bestimmter Grundton vorhanden ist. Dann legt der Unterformant die Tonhöhe fest, der Vokal ist stimmlos, geflüstert. Seine Tonhöhe läßt sich nicht ändern; flüsternd kann man nicht singen.

Die Gesetze, nach denen sich die menschliche Stimme bildet, sind kompliziert, aber hinlänglich bekannt. Nun tritt die moderne Elektroakustik mit einem wahrhaft verwegenen Unterfangen auf den Plan. Sie hat sich nichts Geringeres in den Kopf gesetzt, als die menschliche Stimme mit rein elektrischen Mitteln nachzuahmen. Warum soll das nicht möglich sein? Man braucht zunächst ein elektrisches Gerät, das die Funktion des Kehlkopfes übernimmt, das recht ober-tonreiche Schwingungen erzeugt und dessen Tonhöhe sich bequem verstellen läßt. Hierzu dient ein „Kipp-generator“, eine Elektronenröhre in Verbindung mit

Widerständen und anderen Schaltelementen. Die Schwingungen dieses künstlichen Kehlkopfes werden dann je nach Wunsch durch eine Reihe von Filtern geschickt. Jedes Filter ist ein elektrischer Schwingkreis, der so berechnet ist, daß von den hineingelangenden Schwingungen ein ausgewählter Formantbereich verstärkt herausgehoben wird. Der so geformte Klang wird über einen Verstärker dem Lautsprecher zugeleitet. Mit einer Reihe von Tasten lassen sich die Formantfilter paarweise ein- und ausschalten und alle nur denkbaren Vokale erzeugen. Die stimmlosen, geflüsterten Vokale und die Reibe- und Zischlaute, wie f, s, sch, werden nicht vom Kehlkopf her gesteuert. Das besorgt eine gasgefüllte Röhre, die für sich allein nichts als ein tonloses Rauschen erzeugt, ähnlich einem starken Luftstrom. Auch dieses Geräusch läßt sich mit denselben Formantfiltern so gestalten, daß es den Konsonanten der natürlichen Sprache zum Verwechseln ähnlich klingt. Besonders kurzzeitige Schaltvorgänge lösen die Verschlusslaute d, b, g stimmhaft oder t, p, k stimmlos aus. Die ganze Apparatur ist unter dem Namen „Voder“ (Voice Demonstration Operator) bekannt geworden. Äußerlich sieht das Gerät recht einfach aus. Zehn weiße Tasten, die zum Teil miteinander gekoppelt sind, werden wie eine Klaviatur mit den Fingern betätigt. Eine weitere Taste schaltet auf Vokale oder Konsonanten um, ein Pedal regelt die Tonhöhe. Nach einiger Übung gelingt es leicht, jeden vorgelegten Text fließend zu sprechen oder zu singen.

Laut und deutlich dringt die unheimliche Stimme aus dem Lautsprecher, eine wahre Geisterstimme. Sie kann dröhnen wie die Kehle Stentors oder gleich einem Riesenvogel krächzen im höchsten Diskant.

Höllisches Gelächter erklingt, Hexen heulen im Chor, im tiefsten Baß deklamieren die Riesen der Unterwelt. Sirenen, Sphinx und Nymphen vereinen sich in überirdischen Gesängen. Aus gläsernen Röhren, Spulen und tanzenden Elektronen steigt die dämonische Stimme eines Homunkulus. Man beginnt am Menschlichen zu zweifeln und kann es nicht fassen, daß hier jemand spricht, ohne je gelebt zu haben.

„Was man an der Natur Geheimnisvolles pries,
Das wagen wir verständig zu probieren . . .“

DIE SCHALLGESCHWINDIGKEIT

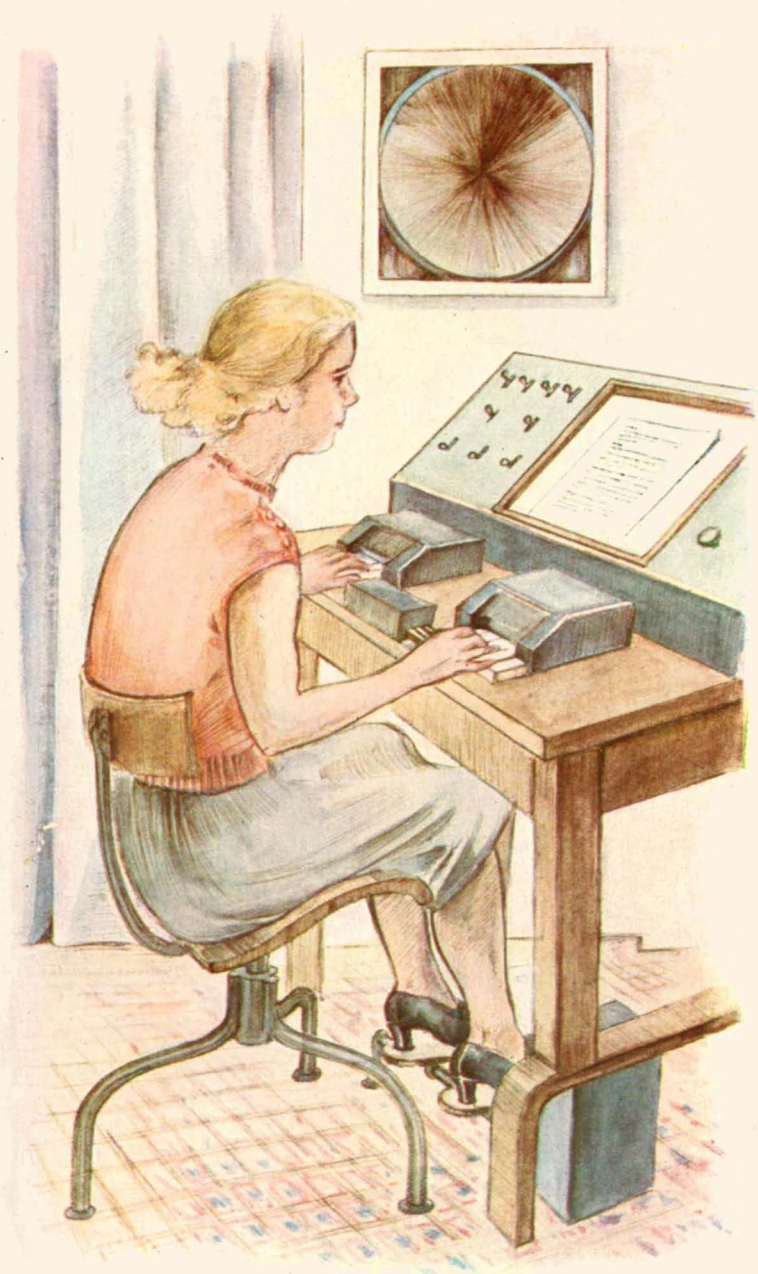
Daß der Schall sich langsamer fortpflanzt als das Licht, war schon im Altertum bekannt. Aber Sinn und Bedürfnis zu exakter Messung kurzer Zeiten entwickelten sich wie der Bau genau gehender Uhren erst mit dem Beginn der Neuzeit. Selbst ein Galilei war bei seinen Untersuchungen über die Bewegungs- und Fallgesetze noch auf vorsintflutliche Wasseruhren angewiesen. Und so mußten Denken und technische Vorbedingungen erst eine gewisse Reife erlangt haben, ehe man sich mit der Messung der Schallgeschwindigkeit befassen konnte.

Den ersten Versuch machte um 1630 der französische Pater Mersenne. Aus der Zeit, die zwischen dem Aufblitzen einer in der Ferne abgefeuerten Muskete und dem Eintreffen des Knalls verstrich, schätzte er die Geschwindigkeit des Schalls auf 448 Meter je Sekunde. Andere Gelehrte schenkten seiner Rechnung bedingungslos Glauben, bis wenige Jahrzehnte später der große Isaac Newton mit einer theoretisch abgeleiteten Formel auf den Plan trat. Und diese lieferte einen Wert von nur 260 m/sec. Sollte sich Mersenne versehen haben, oder steckte in Newtons Ansatz ein Fehler? Das Problem mußte jedenfalls geklärt werden. Fast alle namhaften Gelehrten der damaligen Zeit beteiligten sich daran. Doch waren die Ergebnisse ihrer Beobachtungen nicht einheitlich,

sie lagen samt und sonders etwa in der Mitte zwischen diesen beiden Zahlen. Man entdeckte zwar einen gewissen Einfluß des Windes auf die Schallgeschwindigkeit, stand aber nach wie vor einigermaßen hilflos zwischen einer offenbar noch unvollständigen Theorie und ebenso mangelhaften Versuchstechnik. Dieses ungewisse Stadium zog sich noch lange hin, bis sich die Pariser Akademie entschloß, mit einem großzügig angelegten Experiment unter Verwendung der damals besten Uhren endlich reinen Tisch zu machen.

An einem kühlen Märzabend des Jahres 1738 war alles bereit. Die Pariser hatten wieder einmal ihre Sensation. In Scharen eilten sie zur damals noch unbebauten Anhöhe des Montmartre hinaus, wo eine Gruppe von Soldaten sowie Doktoren der Akademie letzte Vorbereitungen traf. Zwei mächtige 8- und 12pfündige Kanonen ragten mit ihren Mäulern gen Süden. Die Kanoniere hatten alle Hände voll zu tun, die schaulustige Menge hinter den absperrenden Seilen zurückzuhalten. Auf einem Tischchen tickten einige Chronometer, deren Gang von den Herren Dr. Lacaille und Dr. Cassini immer wieder verglichen wurde. Ein langes Fernrohr ging von Hand zu Hand und ward nach Süden gerichtet. Dort lag inmitten des Häusermeeres auf der anderen Seite der in der Dämmerung noch silbern schimmernden Seine die Sternwarte. Hier harrte eine zweite Gruppe von Beobachtern mit Uhren und gezückten Bleistiften des Kommenden. Weit draußen, jenseits des Dunstschleiers der gewaltigen Stadt war eben noch die dritte Meßstation zu unterscheiden, die Windmühle

Voder-Gerät zur Erzeugung künstlicher Sprache





von Fontenay aux Roses. Nur noch ahnen ließ sich, wo der 38 Kilometer entfernte Turm des Städtchens Montlhéry liegen mußte, auf dem die letzte Station mit zwei ebenfalls schußbereiten Kanonen postiert war.

„Glauben Sie noch immer, daß Newton recht haben könnte, Mr. Lacaille?“, fragte Dr. Cassini seinen Kollegen, der sich gerade an einer kleiner Öllampe zu schaffen machte. „Warum auch nicht“, meinte dieser ein wenig spitz, „denn von der Autorität unseres Verehrungswürdigen einmal abgesehen, kann man aus allen bisherigen Experimenten wohl keinen bindenden Schluß ziehen. Oder wollen Sie etwa von zuverlässigen Messungen reden, wenn die Zahlen zwischen 450 und 350 Metern für die Sekunde schwanken? Was mich betrifft, hoffe ich, daß wir diese Nacht dem Newtonschen Wert mindestens ein gutes Stück näher kommen werden.“ — „Allen Respekt vor Ihrem Optimismus“, lächelte der andere und ließ sich das Fernrohr reichen, „und Hut ab vor Newton, wenigstens soweit ich ihn als Mathematiker durchaus schätze. Aber was ich da neulich wieder gehört habe, er soll da ein geradezu tolles Buch herausgebracht haben über ‚Die Prophezeiungen des Daniel und die Offenbarungen des heiligen Johannes‘, eine einfach unglaubliche Phantasterei. Schade, daß dieser Mann seinen guten Ruf derart ruinieren zu müssen glaubt! Mais pardon, ich will Ihnen nicht zu nahe treten, Mr. Lacaille.“ Dieser knöpfte jedoch mit beleidigter Miene seine Mantille zu. Die Erwähnung dieser, zugegebenermaßen doch bedenklich obskuren Seite seines verehrten englischen Freundes konnte seinen

Messung der Schallgeschwindigkeit auf dem Montmartre

Glauben an den Genius keineswegs erschüttern. Nachdenklich sah er dann auf das Thermometer, das inzwischen auf 6° gefallen war.

Dann ein Trompetensignal, das alle Anwesenden zu absoluter Ruhe aufforderte, und wenige Augenblicke darauf senkte sich die Lunte des bedienenden Offiziers auf das Zündloch. Genau 9 Uhr 30, zur verabredeten Sekunde, donnerte der erste Schuß in die Nacht hinaus.

Nach einer halben Stunde sollte die Reihe an Montlhéry sein, alles blickte gespannt dorthin, wo der Horizont zu vermuten war. Da — auf die Sekunde genau — ein kleiner Lichtblitz aus dem Dunkel. Der Finger von Dr. Cassini zuckte, und der Zeiger des Chronometers begann seine Runde über das messingne Zifferblatt. Atemlos lauschten alle in die nächtliche Stille. Fast anderthalb Minute verstrich, bis endlich ein fernes Rollen die Luft durchzitterte. Der Finger zuckte ein zweites Mal und brachte den Zeiger der Uhr zum Stehen. Nur ein leiser Windhauch lag quer zur Schallrichtung, er konnte die Messung kaum beeinträchtigt haben. Sie mußte einwandfrei gelungen sein.

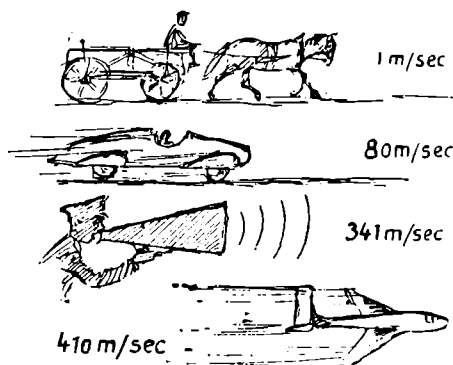
Die friedliche Kanonade währte einige Stunden. Wenn auch ein paar Schüsse im Gemurmel der Volksmenge verloren gingen, sie ergaben allesamt Schallgeschwindigkeiten, deren Werte nahe bei 337 m/sec lagen. Damit mußte zwar Cassini zugeben, daß die Hoffnung seines Amtsbruders nicht ganz abwegig gewesen war. Aber unerklärt blieb noch der Unterschied zwischen dem Ergebnis und der Newtonschen Berechnung.

Die Kunde von den Versuchen drang schnell in die Welt hinaus, und allenthalben bemühte man sich aufs neue, das Problem zu lösen. Aber es fand sich ledig-

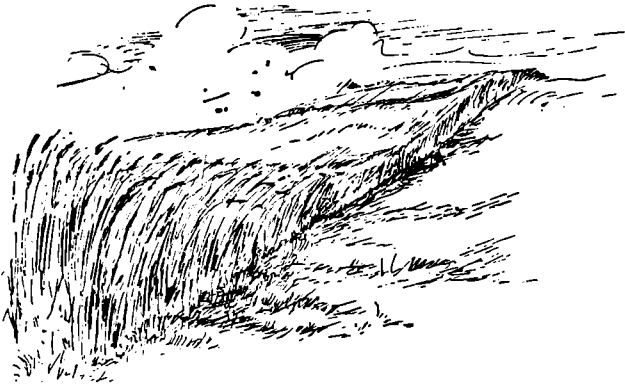
lich, daß die Lufttemperatur einen bestimmten Einfluß habe, indem die Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Erwärmung ansteigt und mit sinkender Temperatur abnimmt. Erst viele Jahre später fand der geniale Laplace 1816 den Schlüssel. Er kam auf den Gedanken, daß innerhalb des sich ausbreitenden Schalls geringfügige Verdichtungen der Luft eintreten und sich dermaßen streng lokalisierte, erwärmte Schichten bilden müßten. Wenn auch keineswegs direkt fühlbar, so mußte dieser Umstand bei der Aufstellung der Formel berücksichtigt werden. Newton hatte das außer acht gelassen, und nachdem Laplace die notwendige Korrektur angebracht hatte, war die so lang vermißte Einheit von Theorie und Experiment hergestellt.

Heute ist erwiesen, bei 0° Celsius legt der Schall in einer Sekunde die Strecke von 331,6 m zurück, und mit jedem Grad Erwärmung nimmt die Strecke um 0,6 m zu. Rechnen wir mit 340 m/sec, so bezieht sich das auf eine Lufttemperatur von 14° C.

Messungen der Schallgeschwindigkeit sind heute keine große Angelegenheit mehr, sie werden mit voll-



automatischen Registriergeräten erledigt. Sollte man für irgendeinen Zweck Zahlenwerte nötig haben, so stehen umfangreiche Tabellen zur Verfügung, aus denen zum Beispiel auch zu ersehen ist, daß der Schall im Wasser 1440 m/sec und im Mauerwerk 3480 m/sec zurücklegt. Überdies ist die Geschwindigkeit des Schalles in der Luft inzwischen durch die Technik überholt worden. Moderne Düsenjäger sind schneller als der Schall; sie haben die Schallmauer durchbrochen. Die Urenkel derer, die einst gespannt dem Schauspiel auf dem Montmartre zusahen, wundern sich wohl kaum noch über ein silbernes Pünktchen, das weit voraus einem heulenden Geräusch am Himmel dahinjagt. Es wird schneller in Montlhéry sein als der Donner jener ehrwürdigen Geschütze, als der Lärm seiner eigenen Motoren.



DER SCHALL ALS WELLE

Als Erschütterungen der Luft, hervorgerufen durch schwingende Körper, haben wir also den Schall erkannt. Schon der als Künstler wie als vorausahnender Erfinder große Leonardo da Vinci hat den Gedanken geäußert, es müsse sich hierbei um eine Art von Wellen handeln, um eine ganz besondere Art schwingender Bewegung, die den Luftraum durch-eilt. Uns ist dafür der Begriff „Schallwellen“ geläufig. Schallwellen sind unsichtbar. Um uns aber ein Bild von ihnen zu machen, versetzen wir uns an den Rand eines Getreidefeldes.

Unbeweglich und dicht gedrängt steht Halm an Halm

in der warmen Sommersonne. Mit rotem Mohn geschmückt und von Schmetterlingen umgaukelt, reift die Frucht der Ernte entgegen. Mit einmal fährt ein Windstoß darüber hinweg und greift rauschend hinein in die schwankenden Halme und Ähren. Er drückt sie, die elastisch nachgeben, zur Seite; die Bewegung pflanzt sich fort, und wie eine Woge flutet sie über das ganze Feld. Eine Welle lief vorüber und endete am jenseitigen Rain. Dann stehen alle Ähren wieder still, und nichts hat sich geändert. Wellenberge und Wellentäler, deutlich sahen wir sie dahinwandern. Aber wo sind sie geblieben? War es nur ein Spuk? Nein, ganz deutlich sahen wir es aus der Nähe, jeder Halm schwang unter der Last seiner körnerschweren Frucht langsam hin und her. Die Schwingungen verliefen in der gleichen Richtung, mit der sich die Welle insgesamt dahinbewegte. Der Physiker stellt also fest, daß es sich hier um „Längs- oder Longitudinalwellen“ handelt.

Zu den Längswellen gehören auch die Schallwellen der Luft, und vom Kornfeld zum „Schallfeld“ führen nur wenige Gedankenschritte. Man hat es nicht mit schwingenden Ähren zu tun, sondern mit den Molekülen der Luft. Sie pendeln in der Schallrichtung um ihre ursprüngliche Ruhelage hin und her, ohne selbst mit der Welle fortzuwandern. So entsteht ein Schallfeld, das aber nicht die Form einer ebenen Fläche aufweist, sondern schalenförmig den Raum rings um den Körper erfüllt, der die Luft zum Schwingen brachte. Jedes einzelne Luftmolekül stößt sein benachbartes Teilchen in der Schwingungsrichtung an. So entstehen Verdichtungen und Verdünnungen in der Luft. Wenn keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden, bilden sie mit zunehmender Entfer-

nung die Gestalt sich stetig vergrößernder Kugelschalen um den Klangerreger.

Man hat das Kunststück fertiggebracht, solche Schallwellen zu photographieren. Die im Abstand je einer Wellenlänge vorhandenen Zonen größerer Luftdichte rufen bei passender Beleuchtung und großer Intensität sichtbare dunkle Schlieren hervor. Die Entfernung zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verdichtungszone stellt die „Wellenlänge“ dar, das ist dasselbe wie der gegenseitige Abstand zweier Wellenberge im wogenden Getreidefeld.

Schallwellen pflanzen sich aber nicht nur in der Luft fort. Alle anderen Körper bestehen ja ebenfalls aus Molekülen, die elastisch um ihre Ruhelagen schwingen können. Eine von außen oder innen her erregte Bewegung wird genauso von einem Punkt zum andern übertragen wie in der Luft, aber noch viel schneller, weil die einzelnen Teilchen fester aneinanderhängen und der Stoß von einem zum andern schneller weitergegeben wird. So läuft im Wasser der Schall fünfmal so schnell wie in der Luft. Taucht man in der Badewanne unter, so hört man jeden vom Wasserhahn herabfallenden Tropfen laut wiederhallen. Taucher berichteten, daß Haifische die Flucht ergreifen, wenn man sie unter Wasser anschreit.

Wenn von Wellen gesprochen wird, denkt man allerdings meist an das Wasser. Ein Stein fällt hinein, und rings um die Aufschlagstelle breiten sich die bekannten anmutigen Ringe, die rasch an Umfang zunehmend über den Teich wandern. Und hier schwimmt ein Blättlein im Wasser. Der Wind hat es vom Baum geweht, gleich wird es die Welle erreicht haben. Was wird mit ihm geschehen, wird es von der Welle davongetragen werden und mit ihr ans Ufer

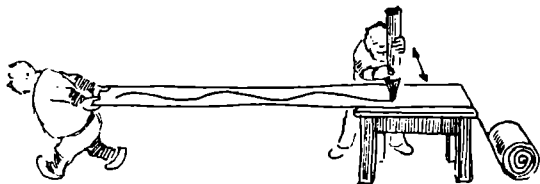
schwimmen? Nichts dergleichen ist zu sehen. Die Welle erfaßt es und gleitet behutsam unter dem Blättchen hinweg, läßt es nur auf- und niederschaukeln. Wie es der kleine Gegenstand verrät, bleiben alle Teilchen des Wassers am gleichen Ort, schwingen auf und ab. Nur der schwingende Zustand, die Welle schreitet fort.

Was wir hier gesehen haben, ist keine Längs-, sondern eine „Quer- oder Transversalwelle“. Alle Teilchen der Wasseroberfläche schwingen quer zur Fort-



pflanzungsrichtung. Derartige Querwellen können auch innerhalb fester Körper entstehen, so daß der Schall sich hier auf zweierlei Weise ausbreiten kann. Der längsschwingende „Körperschall“ läuft mit Geschwindigkeiten bis über 5000 Meter in der Sekunde. Daneben können Transversalwellen auftreten, in denen die Moleküle quer zur Laufrichtung der Welle schwingen. Solche Querwellen laufen aber bedeutend langsamer als Längswellen. Beim Erdbeben kommen beide Arten zugleich vor. Während aber die Längswellen quer durch den ganzen Erdball laufen können, vermögen die Querwellen nur bis zu einer Tiefe von 2900 km vorzudringen. Da man andererseits

weiß, daß im Innern von Flüssigkeiten und Gasen keine Querwellen möglich sind, ergibt sich ein ebenso interessanter wie unheimlicher Schluß: der Kern unserer Erde muß flüssig oder gasförmig sein! Wie das im Wasser schwimmende Blättchen auf- und niederschwingt, während die Welle unter ihm davonläuft, das läßt sich auch mit einem Bleistift nachahmen, den wir in Gedanken auf und ab bewegen. An seiner Spitze ziehen wir in Gedanken einen langen Papierstreifen vorbei, gerade mit der Geschwin-



digkeit, mit der die Welle dahinzieht. Nehmen wir an, die Bleistiftspitze bewege sich in der Sekunde zwanzigmal auf und nieder, der Papierstreifen laufe mit Schallgeschwindigkeit von 340 m/sec vorüber. Zwanzig Wellen schreibt dann der Stift auf das Band. Die Wellenlänge, das ist der Abstand von einem Wellenberg zum nächsten, ließe sich mit Leichtigkeit abmessen. Noch schneller ist sie aber berechnet:

$$\text{Länge einer einzelnen Welle} = \frac{\text{Streifenlänge}}{\text{Anzahl der Schwingungen}}$$

Die Zahlen unseres Beispiels ergeben $\frac{340}{20} = 17$ Meter. Diese Formel hat für alle physikalischen Wellen Gült-

tigkeit, also nicht nur für diejenigen des Schalls. Ganz allgemein gilt demnach

$$\text{Wellenlänge} = \frac{\text{Fortpflanzungsgeschwindigkeit}}{\text{Frequenz}}$$

Zwischen 16 Hz und 20 000 Hz liegt der hörbare Schall. Die Länge der Wellen, die mit dem Ohr wahrnehmbar sind, ist daher recht verschieden. Die größ-

ten sind $\frac{340}{16} = 21,25$ Meter und die kleinsten nur

$\frac{340}{20000} = 17$ Millimeter lang.

DIE GEOMETRIE DES SCHALLS

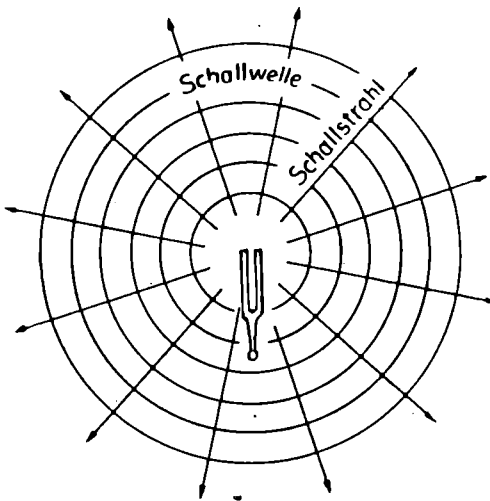
Gesetzt den Fall, es wäre einem mit außerordentlichen Fähigkeiten begabten Chirurgen möglich, die ins Gehirn führenden Seh- und Gehörnerven einer Versuchsperson miteinander zu vertauschen. Weiterhin angenommen, die Nerven würden, ohne Schaden zu nehmen, wieder zusammenwachsen, was wäre wohl die Folge dieser phantastischen Operation? Erschüttert stünde ein von Grund auf verwandelter Mensch einer völlig neuen Welt gegenüber. Die Geräusche der Straße flammten in Wetterleuchten und grellen Blitzen auf, die Wände seines Zimmers wären mit einem Mal durchscheinend bunt, jedes Rascheln huschte als zierliche Funkengarbe vorbei. Gebannt und verzaubert sähe er die Musik vor sich, die ihn in farbenprächtigen und märchenhaften Gebilden umwogte. Neu erlernen müßte er die menschliche Sprache, die ihm in verschlungenen Bändern und schillernder Ornamentik entgegenrankte. Wenn er die Augen öffnete, vernähme er den Wohlklang des Sonnenlichts, und des Nachts sängen ihm Mond und Sterne zauberhafte Melodien.

Grundverschieden voneinander sind die Welten des Lichts und des Schalls, und doch sind sie auch wieder miteinander verwandt. Beide sind Wellenerscheinungen. Eine Welle ist ein bestimmtes Bewegungsprinzip; ihre Eigenschaften äußern sich in immer ähn-

licher Weise. Diese sind vom Licht her unseren Augen deutlich sichtbar, beim Schall müssen wir sie manchmal mühsam suchen.

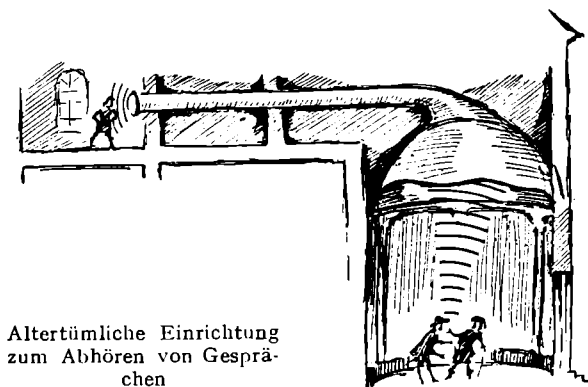
Licht läßt sich spiegeln, brechen, in Linsen sammeln und in seine Spektralfarben zerlegen. Mit Zirkel und Lineal ist man in der Lage, jeden Strahlengang geometrisch zu konstruieren. Seit wann aber soll es „Schallstrahlen“ geben? O bitte, Lichtstrahlen kann man ja auch nicht sehen, sie sind nichts als von der Lichtquelle ausgehende, gedachte, gerade Linien, in deren Richtung sich das Licht nach alter Erfahrung ausbreitet.

Im Kugelschalenmodell des sich nach allen Seiten hin gleichmäßig ausdehnenden Schallfeldes verläuft der Schall ebenso geradlinig. Die Schallstrahlen stellen die Radien einer Kugel dar, in deren Mitte die Schallquelle zu denken ist.



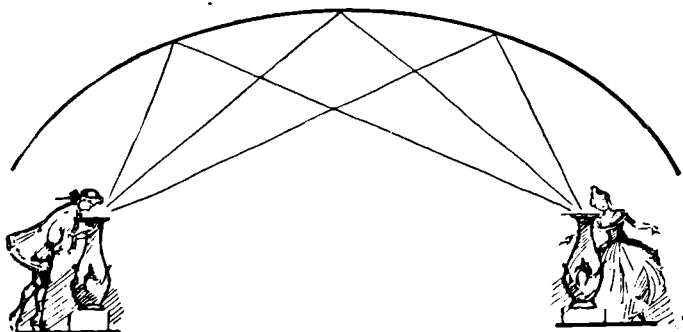
Das Licht spiegelt sich an ebenen, glatten Flächen nach dem Reflexionsgesetz. Dasselbe Gesetz gilt auch für den Schall; hier nennt man sein Spiegelbild „Echo“, und die reflektierende Fläche braucht im Unterschied zur Reflexion des Lichtes nicht unbedingt eben zu sein. Eine Felswand oder ein Waldrand geben bereits die schönste Wirkung. Man muß nur genügend weit entfernt sein, wenn etwa die eigene Stimme deutlich vernehmbar zurückkommen soll. Rechnet man für das Aussprechen einer Silbe $\frac{1}{5}$ Sekunde, so muß der Abstand wenigstens 34 m betragen; denn für Hin- und Rückweg braucht der Schall dann gerade $\frac{68}{340} = \frac{1}{5}$ Sekunde.

Besonders großartige Echowirkungen sind weltberühmt, wie etwa jene am Loreleifelsen, wo ein am Ufer abgefeuerter Pistolenschuß einem Donnerrollen ähnlich sich bis zu zwanzigmal wiederholt. Mehrsilbige Echos sind in vielen Gebirgstälern zu hören. Im Park eines alten englischen Schlosses kann man ein siebzehnsilbiges Echo bewundern.



Altertümliche Einrichtung
zum Abhören von Gesprä-
chen

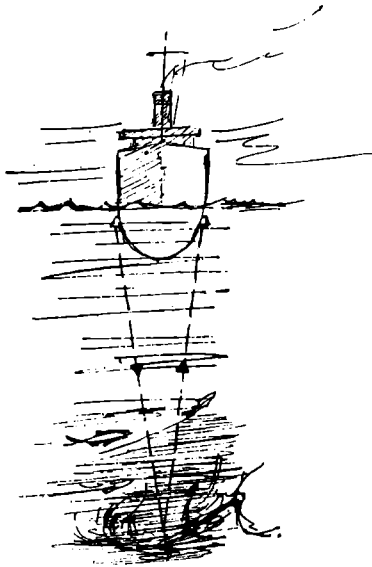
Die Verwandtschaft zum Licht geht weiter. Ein Hohlspiegel vereint in seinem Brennpunkt nicht nur Sonnenstrahlen, sondern ebensogut auch Schallstrahlen. Als es noch kein Telefon gab, leitete man den Schall durch Trichter und Rohre von einem Gebäudeteil in den anderen, wie heute noch auf Schiffen Kommandobrücke und Maschinenraum durch Sprechrohre miteinander verbunden sind. Hierher gehört auch die merkwürdige Reflexion des Schalles im Saal des „Louvre“ zu Paris, in dem weit voneinander getrennt



zwei große Vasen aufgestellt sind. Spricht man in die eine leise hinein, so kommt die Stimme deutlich vernehmbar aus der anderen heraus. Der Baumeister hat die Decke des Saales elliptisch gewölbt, die Vasen sind in den beiden Brennpunkten aufgestellt. Alle vom einen Brennpunkt ausgehenden Strahlen müssen dann, dem Gesetz der Ellipse folgend, sich im anderen Brennpunkt wieder sammeln.

Damit aber genug der Kuriositäten und lehrreichen Spielereien! Es gibt in diesem Zusammenhang auch ernstere Dinge, wie etwa das akustische Echolot, das heute zu jeder besseren Schiffsausrüstung gehört.

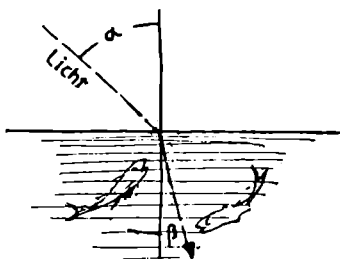
Vielfach benutzte man eine Knallpatrone, die außerhalb des Schiffes zur Explosion gebracht wurde. Der Schall jagt hinab zum Meeresgrund, wird dort reflektiert und kehrt wieder zum Schiff zurück, je nach der Wassertiefe mehr oder weniger bald. Der Start des Schallstoßes wird von einem an der Bordwand an-



gebrachten Mikrophon aufgenommen, die Rückkehr des Echos von einem zweiten, das aber an der anderen Seite des Schiffes sitzt, damit es vom ersten Stoß nicht erregt wird. Diese beiden elektrischen Impulse steuern den von Behm erfundenen Kurzzeitmesser, der im wesentlichen aus einer drehbaren Scheibe besteht. Beim ersten Impuls schnellt sie von einer Feder angetrieben los, der zweite bringt sie augenblicklich

wieder zum Stehen. Der Drehwinkel gibt dann unmittelbar die Meerestiefe an.

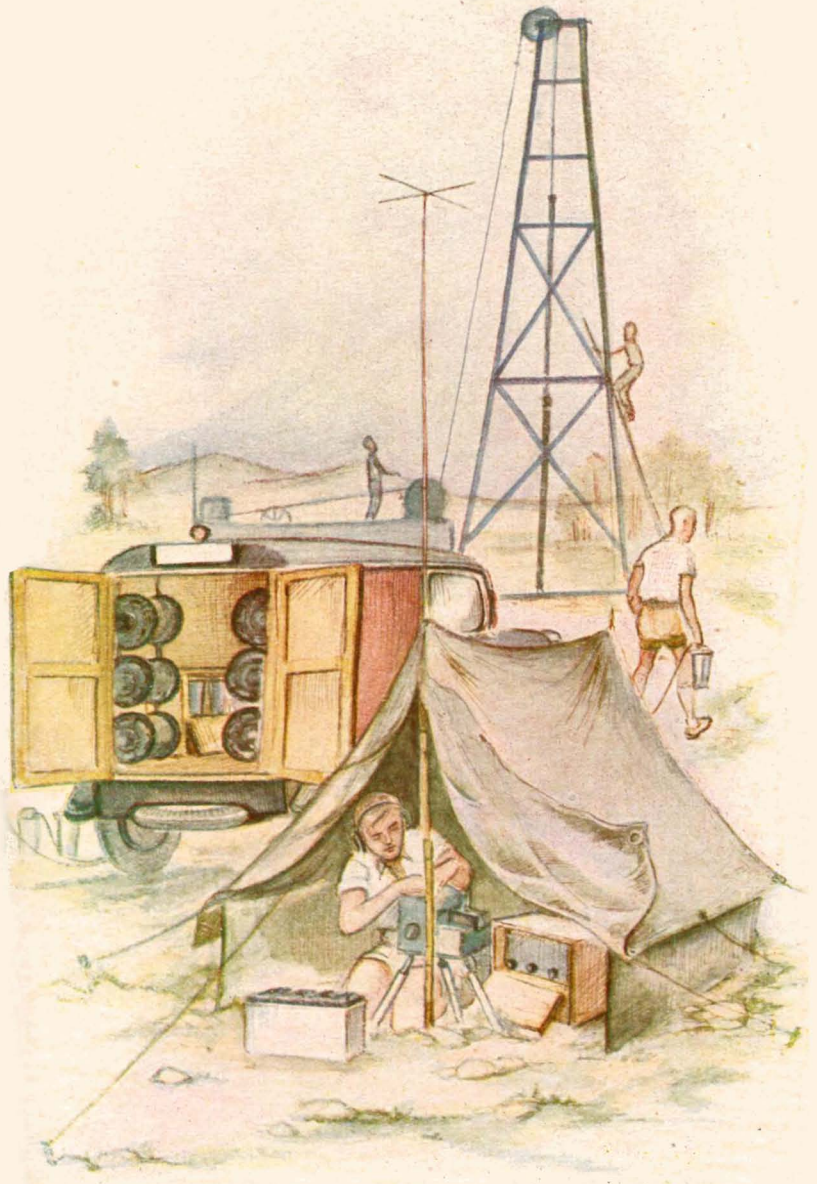
Auch die Brechung des Lichtes ist eine Folge seiner Welleneigenschaft. Die gleiche Erscheinung muß sich beim Schall wiederfinden. Die Lichtbrechung beruht im Grunde genommen darauf, daß die Wellen des Lichtes in allen materiellen Medien, die es zu durchdringen vermag, langsamer laufen als im leeren Raum. Selbst die einzelnen durchsichtigen Stoffe unterscheiden sich wieder dadurch voneinan-



der, daß das Licht in ihnen mit verschiedener Geschwindigkeit vorankommt. Von jeweils zwei miteinander verglichenen Körpern bezeichnet der Fachmann stets denjenigen als „optisch dichter“, den das Licht langsamer durchsetzt.

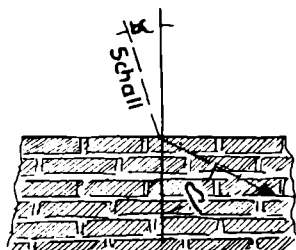
Das Licht wird gebrochen, wenn es beispielsweise schräg gegen die Vorderseite eines durchsichtigen Glasblockes gelenkt wird. Zum Teil wird es an der glatten Oberfläche zurückgeworfen, aber der Rest dringt ins Glas ein. Hier läuft es jedoch nicht in der alten Richtung weiter, sondern die geradlinige Bahn erfährt an der Grenze einen scharfen Knick nach in-

Vorbereitung einer seismographischen Bodenuntersuchung





nen. Damit das an den beiden auf unserm Bild eingetragenen Winkeln hervortritt, ist das sogenannte „Einfallslot“ mitgezeichnet. Der Brechungswinkel β ist deutlich der kleinere. Das entspricht dem Satz: „Beim Übergang vom dünneren ins dichtere Medium wird der Strahl nach dem Einfallslot hin gebrochen!“ Schallstrahlen befolgen das gleiche Gesetz. Da aber die Schallgeschwindigkeit in flüssigen und festen Körpern viel größer ist als in der Luft, hat das Brechungsgesetz gerade die umgekehrte Wirkung. Von außen her auf eine Ziegelmauer fallende Strahlen werden vom Einfallslot weggebrochen.



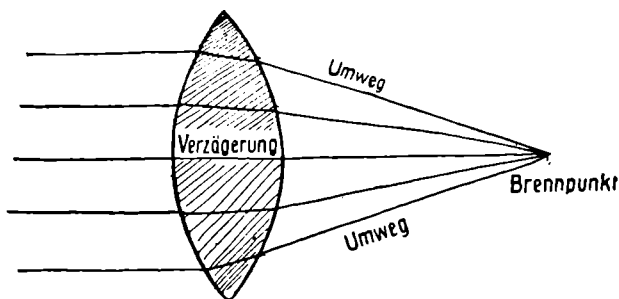
Überschreitet der Einfallswinkel eine bestimmte Größe, so kann überhaupt kein Schall mehr in die Mauer eindringen. Alle Strahlen, die diesen „Grenzwinkel“ überschreiten, werden „total“ reflektiert. Es kann daher nur ein kleiner Teil der von außen auf eine feste Wand treffenden Schallenergie in das feste Material eindringen. Dazu kommen aber noch andere Umstände, wie beispielsweise der große „Schallwellenwiderstand“ einer festen Wand, der den Übertritt erschwert. Auch wird immer ein Teil der Schallenergie in der Wand selbst verschluckt. Alle

Übungen am Monochord

diese Wirkungen faßt der Fachmann unter dem Begriff „Schalldämpfung“ zusammen.

Wir bauen daher unsere Häuser aus dicken Steinwänden, nicht allein, weil diese fest sind und lange halten, sondern auch, weil sie uns vor dem Lärm der Straße schützen. Und schließlich braucht nicht jeder draußen zu hören, was innen geschwätzt wird.

Die raffinierteste Behandlung wird dem Licht durch Linsen und Linsensysteme zuteil. Wir wollen hier nur vom einfachen Brennglas sprechen, das die Strah-

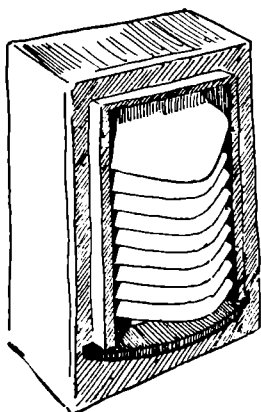


len unserer Sonne in einem winzigen Fleckchen sammelt.

Die Fähigkeit der Linse, parallel einfallende Strahlen in einem Punkt zu vereinen, ist ebenso eine Folge der verschiedenen Geschwindigkeit des Lichts in Luft und Glas. Sie läßt sich folgendermaßen erklären: Da das Licht im Glas langsamer läuft, erfährt es im Linsenbauch eine gewisse zeitliche Verzögerung. Für die randwärts einfallenden Strahlen ist dieser Zeitverlust entsprechend geringer, da die Glasschicht hier immer dünner wird. Dafür ist infolge des geknickten Weges die Entfernung bis zum Brennpunkt größer. Summa summarum aber: wenn man annimmt, daß

alle Strahlen die Linsenfläche zu einem bestimmten Zeitpunkt erreichen, treffen sie allesamt zum gleichen Augenblick im Brennpunkt ein. Der Brennpunkt ist der Ort der Gleichzeitigkeit.

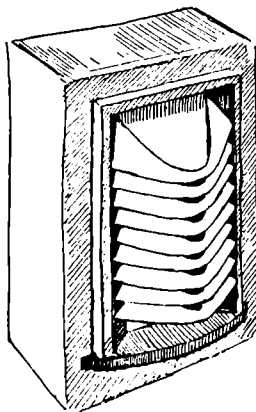
Den Schall zu bündeln, kann man eine akustische Linse benutzen. Um das Prinzip der optischen Linse anzuwenden, verzögert man künstlich die Laufzeit der Schallstrahlen in der Mitte, indem man sie



zwingt, hier einen Umweg zu machen. Solche Linse ist ein luftiges Gebilde. Sie besteht aus einem System von dünnen Holzlamellen, die schräg zu den Schallstrahlen geneigt, vor die Schallquelle gesetzt werden. Bogenförmiger Schnitt bewirkt, daß der Umweg nach dem Rande zu immer kleiner und dadurch eine gute Bündelung erreicht wird. In bezug auf die Richtwirkung ist die akustische Linse den bisher üblichen Schalltrichtern bei weitem überlegen.

In anderen Fällen legt man Wert darauf, den Schall gleichmäßig zu zerstreuen. Bei den Konuslautspre-

chern der gewöhnlichen Radioapparate werden beispielsweise die tiefen Frequenzen fächerartig breit, die hohen jedoch in der Hauptsache direkt nach vorn abgestrahlt. Ein seitlich sitzender Zuhörer kommt nicht in den Genuß der hohen Frequenzen, die zur Natürlichkeit des Klangbildes besonders viel beitragen. Da hilft eine akustische Zerstreulinse. Ihre Holzlamellen sind im Gegensatz zur Sammellinse in der Mitte schmal und am Rande breit. Der Linsendurchmesser darf nicht kleiner sein als eine halbe Wellenlänge. Daher hat eine akustische Linse von handlichen Abmessungen auf tiefe Töne keinen Einfluß. Weil es aber bei der erwähnten Streuwirkung gerade auf die hohen und höchsten Töne ankommt, ist eine Linse von etwa 30 cm Durchmesser vollkommen ausreichend.



SCHATZGRÄBER SCHALL

Die zerklüftete Rinde unserer Erde ist reich an Schätzen. Im Laufe einer langen Vergangenheit wurde ihr äußerer steinerner Mantel von urgewaltigen Kräften tausendfach gefaltet, in Schollen zerbrochen, ineinander verschoben. Hier hoch aufgetürmt und dort in die Tiefe gesunken, von Gletschern und Strömen zernagt und abermals mit Schutt und Sand bedeckt, entstand ein wahres Trümmerfeld. Der Schauplatz der geologischen Umwälzungen ist heute mit einer dünnen Humusschicht nur notdürftig bedeckt, dem einstweiligen Nährboden friedlicher Auen und rauschender Wälder. Was in früheren Zeiten grünte, lebte und in den Meeren schwamm, ist längst vermodert, verkohlt, versteinert. Die Überreste sind im unterirdischen Labyrinth der Erde vergraben. Hier liegen sie in schwarzen Flözen, gerade so, als seien sie für die rohstoffhungrigen Völker unserer Tage absichtlich aufgehoben worden. In Klüften und Spalten aber sickert ein schweres, brenzlich riechendes Öl nach oben. Begehrt und umkämpft, hat es ganze Staaten reich gemacht. Dieses Übrigbleibsel gestorbener Meerestiere oder Erzeugnis aus faulendem Schlamm — man weiß noch nicht einmal recht, wie es zustande kam — ist heute zu flüssigem Golde geworden. Aber wo ist das kostbare Öl zu finden? Wenn man

früher danach suchte, war man auf den Zufall und oberflächlich erkennbare Spuren angewiesen. Ein einziges Bohrloch verschlang Hunderttausende. Wenn das Glück hold war, dem schwemmte es Millionen zu, der vom Pech verfolgt stand verzweifelt vor dem Zusammenbruch seines Unternehmens. Bessere Aussichten hätte man gehabt, wenn man vorher den Verlauf der unterirdischen Gesteinsschichten gekannt hätte. Horizontale Lagerung der ölführenden Schicht ist beispielsweise ungünstig. Hier läuft das Öl in die Breite, ohne sich zu sammeln. Viel aussichtsreicher sind geneigte Schichtungen, in denen die leichte Flüssigkeit dem höchsten Punkt zustrebend sich aufspeichert. Häufig steht es hier noch unter dem Druck von darüberliegendem Erdgas und schießt dann in dickem Strahl von selbst aus dem Bohrloch.

Die schräge Neigung der Gesteine muß aber eine Ursache haben. Irgendeine Kraft hat sie von unten erfaßt und nach oben aufgewölbt. Der Anlaß war in vielen Gegenden ein Salzstock. Zwar lagen die unterirdischen Salzmassen auch einmal waagrecht, wie sie sich aus ihren Meeren einst abgeschieden haben. Von gebirgsbildenden Kräften wurden sie dann in steile Falten gelegt und nach oben gedrängt. In der unmittelbaren Umgebung, an den Flanken eines solchen Salzdomes müssen nun die Aussichten für die Ölsucher besonders günstig sein. Erfahrene Geophysiker erhalten daher den Auftrag, diese oft in größerer Tiefe steckenden Salzhorste ausfindig zu machen, ihren genauen Umriß und vor allem die Stellen zu erkunden, wo eine Bohrung nach Öl lohnen könnte.

Sie haben nicht nur eine einzige Methode. Man muß

ja sicher gehen. Oft setzt man umfangreiche Schwere-messungen an; denn die relativ leichte unterirdische Salzmasse verrät sich in empfindlichen Meßgeräten durch eine nachweisbare Verringerung der Schwerkraft. Der andere Weg ist die „Seismische Methode“. Sie benutzt den Schall. Eine Pulverladung wird zur Detonation gebracht. Die Erschütterungswellen dringen bis in große Tiefen vor und werden in den einzelnen Bodenschichten vielfach gebrochen und reflektiert. Schließlich kehren sie zur Erdoberfläche zurück, und der Zeitpunkt ihres Eintreffens wird sorgfältig festgehalten. Als Empfänger dienen handliche Apparate, Miniaturausgaben der zur Erdbenenforschung verwandten Seismographen. In einem Gehäuse befindet sich ein elastisch aufgehängtes Gewicht, dessen Schreibhebel bei ruhendem Boden auf der rotierenden Schreibtrommel einen geraden Strich zieht. Infolge seiner Trägheit vermag das Gewicht raschen Bodenschwingungen nicht zu folgen und bleibt beim Eintreffen einer Erschütterungswelle in Ruhe. Der übrige Apparat macht die Bewegungen mit, und der Stift zeichnet eine Zackenlinie auf.

Eintönig und eben dehnt sich das Jagdgelände. Heidekraut und vereinzelte Birken, Sand und Moor, die ganze Gegend scheint geologisch so uninteressant wie nur möglich zu sein. Eines Morgens holpern aber einige staubbedeckte Lastwagen daher. Ihnen entsteigt ein Trupp von Männern. Einige breiten Landkarten und Pläne aus, deuten in angeregtem Gespräch Punkte im Gelände an. Andere schlagen Pflöcke ein, ziehen Meßbänder, bauen Zelte. So entwickelt sich ein geschäftiges Treiben. Sogar ein kleiner transportabler Bohrturm ist auf einem der Wagen

verstaut. Will man damit etwa schon den ersten Versuch wagen? Nein, dazu ist sein Gerüst viel zu leicht. Nur bis zum Grundwasser, etwa zehn bis zwanzig Meter tief schiebt sich der Bohrer in den Sand. Dann aber werden ansehnliche Pakete von Sprengstoff herbeigeschleppt. Über einen halben Zentner verschluckt das Loch. Schließlich wird die Öffnung wieder mit Sand zugeädämmt. Allein ein dünnes Kabel verrät, daß hier ein Schuß gelöst werden soll.

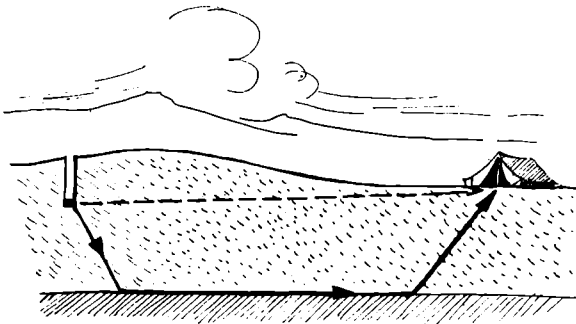
In weitem Umkreis um das geladene Bohrloch sind inzwischen Zelte mit elektrischen Geräten und kleinen Empfangsantennen entstanden. Die drahtliche Verbindung mit dem Sprengpunkt ist in Ordnung. Damit ist alles für den nächsten Morgen bereit.

Die Angelegenheit wäre nicht viel Aufhebens wert, wenn es nur darum zu tun wäre, aus Laufweg und Laufzeit des Explosionsschalles die Geschwindigkeit zu bestimmen, mit welcher er die oberen Erdschichten durchheilt. Über die Schallgeschwindigkeiten in den verschiedensten Boden- und Gesteinsarten ist man längst im Bilde. Man interessiert sich vielmehr für gewisse Umwege, die der Schall auf seiner unterirdischen Bahn einschlägt.

In der Tiefe liege unter dem Sand kompaktes Gestein. Von den unter allen möglichen Winkeln einfallenden Schallstrahlen dringen viele in die härtere Schicht ein und laufen dort in veränderter Richtung weiter. Aber es ist nur der kleinere Teil. Der Schall läuft ja im Gestein schneller als im Sand. Nur jene Strahlen können in die schallschnellere Schicht übergehen, die innerhalb des Grenzwinkels liegen, von dem im letzten Kapitel die Rede war. Alle flacher einfallenden müßten also eigentlich an der Oberfläche des harten Gebirges als einfaches Echo reflektiert wer-

den. Doch etwas Unerwartetes geschieht. Sie laufen als Oberflächenwellen auf dem Untergrund nach allen Richtungen davon, und zwar mit der im Gestein gültigen hohen Geschwindigkeit. Von allen Punkten aber gehen neue Strahlen unter dem Reflexionswinkel aus und gewinnen wieder die Erdoberfläche.

Der Knall der Detonation erreicht den empfangenden Apparat demnach auf zwei Wegen: einmal auf

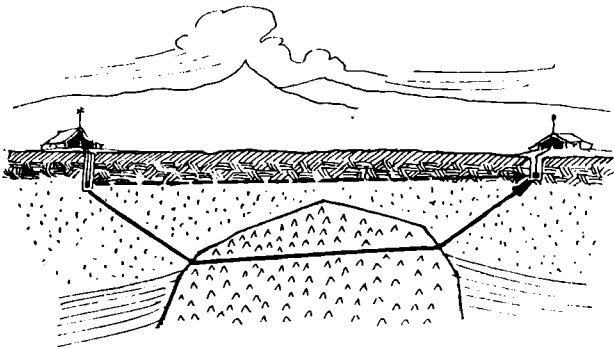


dem direkten Weg durch den Sand, zum andern auf dem doppelt geknickten Umweg von unten her. Aus dem Unterschied der Laufzeiten läßt sich dann die Tiefe der Schicht berechnen. Will man den Neigungswinkel einer schräg liegenden Schicht bestimmen, so sind mindestens zwei Beobachtungspunkte notwendig.

Wir haben hier nur das Grundprinzip erklärt. Es kann aber auch vorkommen, daß der Schall auf seiner gebrochenen Bahn den Salzstock durchquert und auf seiner andern Seite wieder nach oben

kommt. So ist es keine leichte Aufgabe, die verworrene Zackenschrift der Seismometer richtig zu deuten. Fingerspitzengefühl und Kombinationsgabe routinierter Beobachter spielen dabei eine entscheidende Rolle.

Eine andere Arbeitsmethode stützt sich auf die direkte Reflexion des in größere Tiefen dringenden Schallanteils. Es liegen aber meist mehrere Gesteins-



schichten übereinander, die ein vielfältiges Echo ergeben.

Nach mühsamer Arbeit entsteht auf einer großen Landkarte allmählich das getreue Abbild des Salzstockes in Grund- und Aufriß. Der Bohrmeister ersieht daraus, wo und mit welchen Erfolgsaussichten er seine Arbeit in Angriff nehmen kann.

Für das gleiche Geld, das ehemals eine einzige Bohrung kostete, kann man heute ein 350 Quadratkilometer großes Gebiet seismisch erkunden. Die gesammelten Kenntnisse über den geologischen Bau des Untergrundes sind nicht nur für den beabsichtigten

Zweck, sondern auch für späterhin äußerst wertvoll. Ganze Ölfelder sind auf diese Weise bereits entdeckt worden, und noch weitere werden sich wohl finden lassen.





PYTHAGORAS UND DIE TONLEITER

Stahlblau und wolkenlos wölbt sich der südliche Himmel über Kroton, in dessen Mauern einer der berühmtesten Männer seiner Zeit lebte und wirkt: Pythagoras, Schöpfer der modernen Mathematik.

„So höre denn noch einmal, mein trefflicher Milon, und sei eingedenk all der Bemühungen, die wir in jeder nur möglichen Hinsicht unternommen haben: Die Zahl ist das Wesen aller Dinge! Zahlen bestimmen Flächen, Figuren und jedwede Gestalt. Nichts ist, was nicht meßbar wäre. Siehst du aber nach, was du beim Messen erhalten hast und setzt die Ergebnisse in Beziehung zueinander, so wirst du es immer

bestätigt finden. Vornehmlich achte darauf, was sich beim Vergleich des Vollkommensten mit dem Gewöhnlichen, des Höheren mit dem Niederen zeigt. Je einfacher du die Zahlenverhältnisse findest, je kleiner die in diesen Verhältnissen enthaltenen Zahlen sind, um so vollkommener werden die Dinge auch sein und dir um so schöner erscheinen. Nimm das Monochord zur Hand und sage mir dann, was du gefunden!“

Mit diesen Worten wandte sich Pythagoras von seinem Schüler ab und schritt einer anderen Gruppe im gegenüberliegenden Säulengang zu. Milon blickte seinem Meister noch eine Weile sinnend nach. „Das Wesen aller Dinge“, wiederholte er für sich selbst, „alles Sein und Werden ist Verkörperung eines einzigen, allumfassenden Prinzips.“ Bisher glaubte er, nur Quantitäten, nur Mengen seien zählbar und in Zahlen auszudrücken. Nun öffneten sich seinem staunenden Geiste neue, unerwartete Möglichkeiten. Auch die Qualität, alles, wie es nach seinem Inhalt und seiner Art auf die Sinne wirkt und sich nicht weiter zerlegen läßt, sollte in Zahlen Ausdruck finden. Was man hinsichtlich der Proportionen geometrischer Formen entdeckt hatte, sollte auch für die Farben gelten, für das Schöne und Häßliche, das Angenehme und Unangenehme. Und damit war Milon wieder bei dem angelangt, wovon sein geliebter Lehrmeister soeben gesprochen hatte.

Neben ihm im Schatten lehnte das Monochord, ein langer Kasten aus Zedernholz. Er nahm das leichte Instrument zur Hand und setzte sich auf eine marmorne Bank. Ein elfenbeinerner Wirbel spannte die kräftige Darmsaite der Länge nach über das Gehäuse. Es war immer nur ein einziger Ton, den Milon

durch Anzupfen der Saite hervorbringen konnte, und nicht erklangen mehrere zugleich, wie bei jener achtsaitigen Kithara, die Pythagoras jüngst hatte anfertigen lassen. Doch konnte er mit der Linken ein zwischen Gehäuse und Saite eingeklemmtes Dreikantholz hin- und herschieben. In solcher Weise mehr oder weniger verkürzt, gab die Saite bei gleichbleibender Spannung Töne verschiedener Höhe von sich. Ja mehr noch: auf dem Gehäuse waren Striche aufgezeichnet, die besonders wichtige Stellungen des Steges und damit Töne besonderer Art festlegten. Dergestalt war das Monochord weniger ein Musikinstrument als ein physikalischer Apparat, der in wunderbarer Weise geeignet war, die Gesetze der ursprünglichsten und reinsten Harmonien zu enthüllen und in Zahlen umzudeuten.

Pythagoras und seine Schule sind nicht mehr. Nur einige Mauerreste künden noch von der einst so blühenden Stätte ihres Wirkens. Doch ihre geistige Saat hat tausendfältige Frucht getragen. Form und Anwendung ihrer Lehre haben sich gewandelt, doch das Grundprinzip des pythagoreischen Denkens, jedwede Erscheinung der Natur in Maß und Zahl darzustellen, hat sich inzwischen nahezu aller Gebiete der Wissenschaften bemächtigt. Auf Pythagoras führen wir auch unser musikalisches Tonsystem zurück. Er war nicht der eigentliche Erfinder. Auf seinen langen Reisen in Kleinasien und Ägypten hat er uralte musikalische Kenntnisse gesammelt, sie aber dann vertieft und in ein festes System gebracht.

Es handelte sich zunächst um den Zusammenhang zwischen Saitenlänge und Tonhöhe. Die wichtigste

und zugleich einfachste Unterteilung der Saite ergibt sich, wenn der Steg sie genau in der Mitte teilt. Es entsteht dann beim Anzupfen ein hoher Ton, der dem Grundton zum Verwechseln ähnlich klingt. So vollkommen passen beide zueinander, daß sie gleichzeitig erklingend fast zu einem einzigen verschmelzen.

Diesen Tonabstand, das „Intervall“, das sich beim Verhältnis der Saitenlängen von $\frac{1}{2} : 1$ ergibt, nennen wir eine „Oktave“.

Verschiebt man den Steg so, daß er $\frac{2}{3}$ der vollen Länge abtrennt, so entsteht beim Anzupfen die „Quinte“. Die Sprache hat uns keine Worte gegeben, um den Klang einer reinen Quinte näher zu beschreiben, wir empfinden ihn einfach als harmonisch, wohltuend. Mit außerordentlicher Genauigkeit bemerkt unser Ohr auch die feinste Abweichung von der reinen Quinte, und fast alle Streichinstrumente sind in dieser Weise gestimmt. Jede Saite einer Violine ist die Quinte der vorhergehenden.

Zweiklänge, die wie die Oktave und Quinte angenehm und ohne inneren Widerspruch ins Gehör eingehen, nennt man „Konsonanzen“. Hierzu gehört auch die „Quarte“. Man erhält sie, wenn man den Steg so verschiebt, daß er $\frac{3}{4}$ der Saitenlänge abtrennt. Ein wenig herzhafter und härter als die Quinte fügt sie sich mit dem Grundton zusammen. Auch ohne besondere musikalische Schulung erkennt das Ohr sofort, ob eine Quarte rein ist oder nicht.

Damit waren vier Töne der bekannten 8-stufigen Tonleiter gefunden, die wir mit der Buchstabenfolge **c** d e **f** **g** a h **c'** d' e' f' g' a' h' c'' bezeichnen. Die hier eingerahmten Töne haben wir als „Prime“ c (Grundton), Quarte f, Quinte g und Oktave c' festgelegt.

Wie sollen aber die noch fehlenden Töne dieser Reihe — d, e, a, h — bestimmt werden?

Pythagoras tat es unter alleiniger Verwendung der beiden reinsten Intervalle, der Oktave und der Quinte. Er sagte sich, anstatt vom c auszugehen, könnte man auch ebensogut den Ton g als Grundton nehmen. Um die Quinte zu diesem g zu finden, mußte die bereits auf $\frac{2}{3}$ verkürzte Saite noch einmal im gleichen Verhältnis kleiner gemacht werden. Sie behielt $\frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} = \frac{4}{9}$ der ursprünglichen Länge, war also ein wenig kürzer als die Hälfte. Der Ton lag demzufolge auch ein wenig höher als die Oktave c'; es war der Ton d'. Denkt man sich die Länge dieser so verkürzten Saite wiederum verdoppelt, so muß der neue Ton in seiner tieferen Oktave d erklingen und hat dann die Länge $\frac{8}{9}$. Damit ist die „Sekunde“ d gefunden.

Um einen weiteren Ton zu erhalten, setzte Pythagoras auf den Ton d' eine weitere Quinte und erhielt den hohen Ton a'. Seine tiefere Oktave ist a, dem ein

Bruchteil von $\left(\frac{2}{3}\right)^3 \cdot 2 = \frac{16}{27}$ der vollen Saitenlänge

entspricht. Das neue Intervall stellt die „Sexte“ dar. Auf den Ton e stieß er mittels vier aufeinanderfolgender Quinten und zweier rückschreitender Oktaven mit der daraus folgenden Saitenlänge von

$$\left(\frac{2}{3}\right)^4 \cdot 2^2 = \frac{64}{81}.$$

Damit entstand die „Terz“. Die letzte Lücke ward geschlossen von der „Septime“. 5 Quintenschritte und 2 Oktavreduktionen führten zum h.

Ihm entsprach der Bruchteil von $\frac{128}{243}$ der vollen Saitenlänge.

Weit bis ins Mittelalter hinein war die pythagoreische Stimmung die Grundfeste der Musiklehre. Man war wohl des sicheren Glaubens, daß aus den beiden einfachsten Zahlenverhältnissen, Oktave und Quinte, auch vollkommenster Wohlklang der ganzen Tonleiter entspringen müsse. Sie baut sich allein aus den Zahlen 1, 2 und 3 auf. Das wird besonders deutlich, wenn wir die Saitenlänge des Grundtons mit 1 annehmen und die übrigen als Potenzen schreiben:

$$\begin{array}{l} \text{Töne: c d e f g a h c',} \\ \text{Saitenlängen: } 1 \quad \frac{2^3}{3^2} \quad \frac{2^6}{3^4} \quad \frac{3}{2^2} \quad \frac{2}{3} \quad \frac{2^4}{3^3} \quad \frac{2^7}{3^5} \quad \frac{1}{2} \end{array}$$

Den Anforderungen des einstimmigen Musizierens genügte diese Tonleiter; der gebräuchliche Tonumfang ging kaum über den Bereich der menschlichen Stimme hinaus. Bis ins 12. Jahrhundert saßen auf den Windläden der Orgeln nur acht Pfeifen für die dieser Leiter zugehörigen Töne, höchstens einmal darüber hinausgehend fünfzehn. Zum Stimmen der anspruchlosen, mit klobigen Tasten zu bedienenden Instrumente benutzte man das Monochord.

Statt nach Saitenlängen kann man die Tonleiter auch nach den entsprechenden Schwingungszahlen ordnen. Zwar kümmerten sich die Pythagoreer noch nicht um die Frequenzen. Aber ihr Griff nach dem Monochord war zufällig der glücklichste, den sie tun konnten. Hier ist der Zusammenhang einfach: Je kürzer die Saite, desto größer ist ihre Frequenz. Oder ein wenig exakter: Die Frequenzen verhalten sich umgekehrt zueinander wie die Saitenlängen.

Wenn wir vorhin zum Beispiel sagten, daß bei einem Längenverhältnis von $\frac{2}{3} : 1$ eine Quinte entsteht, dann muß die Quinte im Verhältnis zum Grundton

die $\frac{3}{2}$ - oder 1,5fache Schwingungszahl aufweisen. In unserer Tonleiter ergeben diese reziproken Saitenlängen das folgende Schema:

Töne: c d e f g a h c'
 Frequenzen: 1 9/8 81/64 4/3 3/2 27/16 243/128 2/1

Mit dieser Schreibweise machen wir uns von der individuellen Beschaffenheit eines besonderen Instrumentes frei. Die Frequenzverhältnisse gelten für die Töne schlechthin, ganz gleich, mit welchem Apparat sie hervorgebracht werden.

Die Zahlenreihe mag auf den ersten Blick ein wenig verwirrend erscheinen. Das Bild klärt sich jedoch, wenn wir die Frequenzverhältnisse je zweier aufeinanderfolgender Töne berechnen. Zwischen e und d besteht das Verhältnis $\frac{81}{64} : \frac{9}{8}$, das ergibt $\frac{9}{8}$. Dasselbe Ergebnis erhalten wir zwischen g und f, a und g, h und a. Lediglich zwischen f und e finden wir

$$\frac{4}{3} : \frac{81}{64} = \frac{256}{243},$$

denselben Wert wie zwischen c' und h.

Töne: c d e f g a h c'
 Tonschritte: $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{256}{243}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{9}{8}$ $\frac{256}{243}$

In der heutigen Ausdrucksweise sind das 5 Ganzton- und 2 Halbtönschritte oder Intervalle. Mit solcher Einfachheit war die pythagoreische Skala später aufgekommene neueren Tonsystemen eindeutig überlegen. Die mathematische Schlichtheit war wohl auch einer der Gründe, auf dem die lange Zeit unangefochtene Geltung dieser Skala beruhte.

DURCHBRUCH ZUR WAHREN HARMONIE


Indessen regte sich die Opposition. Gelehrte von unbestrittenem Ruf, Didymos, Ptolemäus und viele andere, erhoben ihre Stimme. „Wieso“, riefen die Widersacher Pythagoras', „soll die Zahl das Gesetz der Musik bestimmen? Es geht doch nicht um mathematische Spekulationen, sondern um den Wohlklang. Mit Fug und Recht darf es nur einen Richter geben: das Gehör!“

Stein des Anstoßes waren vor allem zwei Intervalle, die Terz e-c mit ihrem Frequenzverhältnis $\frac{81}{64}$ und die a-c-Sexte mit $\frac{27}{16}$.

Diese beiden Intervalle waren in der pythagoreischen Tonleiter „Dissonanzen“, Mißklänge. Das Ohr empfindet sie als unrein. Unangefochten blieben lediglich die „Konsonanzen“ Oktave, Quinte und Quarte, die glatt und ohne inneren Widerspruch ins Gehör eingehen. So fanden denn die Reformatoren, daß eine wirklich rein gestimmte Terz das Frequenzverhältnis $\frac{5}{4}$ und die Sexte das Verhältnis $\frac{5}{3}$ haben müsse.

Daß man früher oder später auf diese Intervalle stoßen mußte, liegt schon im Schwingungsgesetz der einfachen Saite verborgen. Wir wissen ja, daß die stets

vorhandenen Oberschwingungen mit der Grundschwingung die Frequenzverhältnisse 1:2:3:4:5... bilden. Reine Terz und Sexte werden demnach ohne jedes Zutun von jeder frei schwingenden Saite hervorgebracht. Hier bietet die unverbildete Natur Intervalle von entschieden größerer Vollkommenheit als jene, die sich nach der pythagoreischen Berechnung ergeben. So forderten die Harmoniker, daß diese neuen reinen Zweiklänge in das System mit einbezogen werden müßten. Damit entstand die „diatonische Dur-Tonleiter“:

c	d	e	f	g	a	h	c
							
1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	$\frac{2}{1}$
1	1,13	1,25	1,33	1,5	1,67	1,88	2

Um die Zahlen sinnfälliger zu machen, wurden sie hier als Bild einer von 1 bis 2 laufenden Strichskala maßstäblich dargestellt. Die Quinte g steht dabei mit $\frac{3}{2} = 1,5$ in der Mitte.

Obwohl die Überlegenheit der neuen reinen Intervalle gegenüber den künstlich konstruierten auf der Hand lag, hat sich das pythagoreische Erbe noch lange Zeit behauptet. Wie vieles andere ist eben auch das musikalische Gefühl einer historischen Entwicklung unterworfen. Die Terz hatte es nicht leicht, sich durchzusetzen. Lange galt sie als unvollkommene Konsonanz. Heute, da uns dieser Zweiklang von geradezu strahlender Schönheit dünkt, mag das unbegreiflich scheinen.

Aber auch der Quarte erging es so. In einem musikwissenschaftlichen Werk konnte man noch 1775 lesen:

„Ein gewaltiger Krieg ist über die Frage entstanden, ob die Quarte müsse zu den Konsonanzen oder Dissonanzen zugezählt werden. Und dieser Streit ist bey vielen bis an diese Stunde nicht entschieden.“ — Geschmackssache!

Freilich ist die innere Struktur des harmonischen Tonsystems komplizierter. Berechnet man die zwischen den einzelnen Tönen liegenden Intervallverhältnisse, so ergibt sich die Reihe

c	d	e	f	g	a	h	c,
	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$
	Großer Ganzton	kleiner Ganzton	Halb- ton				

Hierbei tauchen mit einem Mal zwei verschiedene Ganztonstufen auf, die sich ein wenig voneinander unterscheiden. Den Gelehrten machte dieser offenbar nicht vermeidbare Schönheitsfehler einigen Kummer. Sie bezeichneten ihn als „didymisches“ oder „syntonisches“ Komma, worunter man das Verhältnis $\frac{9}{8} : \frac{10}{9}$ versteht. Auch die Quinten sind nicht alle ganz rein, wie beispielsweise a—d. Zwischen diesen beiden Tönen besteht ein Verhältnis von $\frac{5}{3} : \frac{9}{8} = \frac{40}{27}$. Ihr Verhältnis zur reinen Quinte ist abermals das syntonische Komma $\frac{3}{2} : \frac{40}{27} = \frac{81}{80}$. Die Reinheit einzelner wichtiger Intervalle muß also mit kleinen Unebenheiten in anderen Teilen erkauft werden. Neben dieser Dur-Tonleiter steht die Moll-Tonleiter. Ihre Intervalle lauten:

1	$\frac{9}{8}$	$\frac{6}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{8}{5}$	$\frac{9}{5}$	$\frac{2}{1}$
---	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------	---------------

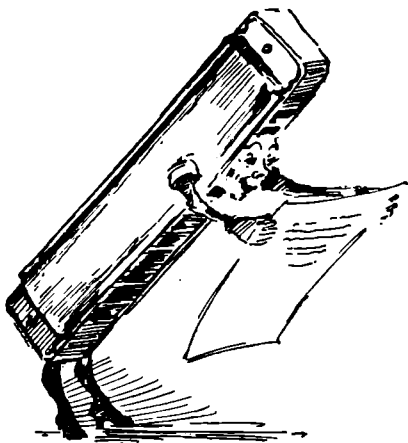
Für sie ist die „kleine Terz“ ($\frac{4}{5}$) charakteristisch. Dur- und Moll-Dreiklang unterscheiden sich im Grunde genommen nur durch die Reihenfolge ihrer Intervalle:

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{C} & & \text{E} & & \text{G} \\
 & \frac{5}{4} & & \frac{6}{5} & \\
 & & \frac{3}{2} & &
 \end{array}$$

Dur-Dreiklang

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{C} & & \text{Es} & & \text{G} \\
 & \frac{6}{5} & & \frac{5}{4} & \\
 & & \frac{3}{2} & &
 \end{array}$$

Moll-Dreiklang



VON DER MUNDHARMONIKA ZUM WOHLTEMPERIERTEN KLAVIER

„Liebe kleine Harmonika! Schon so manche Stunde hast Du mir mit Deinem zarten Stimmchen versüßt. Nur wenige Groschen brauchte ich auszugeben, als ich Dich samt der schönen Schachtel mit nach Hause nahm. Bunt und munter wie Deine Hülle war auch Dein Klang. Hundert fröhliche Weisen schmettertest Du auf unseren Wanderwegen, freudig und unbekümmert, immer heiter und alles in c-Dur. Nichts war an Deinem messingnen Zünglein auszusetzen,

harmonisch aufs beste gestimmt, konnte man Dir sogar zwei Akkorde entlocken. Doch, ich kann's nicht länger verheimlichen, ich habe Dich, gelinde gesagt, einfach satt! Du kannst nichts, als immer und ewig nur eine einzige Tonleiter singen. Jedes Liedchen muß ich in derselben Tonart spielen. Sei mir nicht böse, mir ist es auf die Dauer zu langweilig. Vielleicht findest Du einen anderen, einen Virtuosen vielleicht, der mehr als ich bescheidener Stümper mit Dir anzufangen weiß. Lebe wohl und nichts für ungut!“

Als die hübsche, kleine Harmonika diesen Brief gelesen hatte, war sie nicht im mindesten beleidigt. Im Gegenteil, schallend und silbern lachte sie geradeheraus. Hatte sie nicht viele tausend andere Freunde, denen sie Freude und Kurzweil genug bescheren konnte?

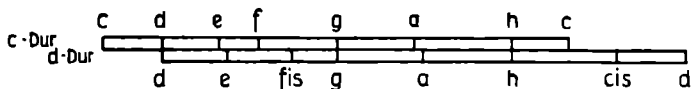
Doch unter uns gesagt, es ist tatsächlich so, mit einer einzigen Tonleiter — und mag sie noch so schön gestimmt sein — läßt sich nicht allzuviel anfangen. Der Wunsch nach größerer Abwechslung und Bereicherung des Klangbildes ist nun einmal da und drängt auch in eine ganz bestimmte Richtung. Wenn es darum geht, die Eintönigkeit der c-Dur-Leiter zu durchbrechen, muß man wenigstens von jedem Punkt dieser Skala ausgehend weitere gleichwertige Tonleitern aufbauen können. Dann wäre auch das Problem des „Transponierens“ gelöst. Jede beliebige Melodie könnte dann von jedem beliebigen Ton aus angestimmt werden. Beim Singen macht das allerdings nicht die geringste Schwierigkeit. Jedes kleine Mädchen kann nach Wunsch mit Leichtigkeit seine Stimmlage verändern. In der geschichtlichen Entwicklung der Orgel, des Klaviers und aller anderen Instrumente, deren Töne im einzelnen genau fest-

gelegt sind, hat diese Frage aber das größte Kopferbrechen verursacht.

Machen wir also den Versuch, eine d-Dur-Tonleiter herzustellen! Damit sie das gleiche innere Klanggefüge wie die c-Leiter erhält, müssen ihre Töne in den nämlichen Frequenzverhältnissen zueinander stehen. Die d-Leiter muß in denselben Intervallschritten aufwärts steigen wie die c-Leiter.

Der erste Schritt muß demnach ein großer Ganzton sein. Er führt auf einen Ton, der die $\frac{9}{8}$ oder 1,125fache Schwingungszahl des d hat. Er ist demnach ein wenig höher als das e der c-Leiter ($\frac{10}{9} = 1,111$), kann aber zur Not noch als e bezeichnet werden. Der nächste Ton hat als Terz die $\frac{5}{4}$ oder 1,25fache Frequenz des d oder die $\frac{9}{8} \cdot \frac{5}{4} = \frac{45}{32} = 1,41$ fache Frequenz von c. Ihn einfach dem Ton f der c-Leiter gleichzusetzen, geht aber nicht an. Dazu ist die Abweichung doch zu groß. Es bleibt nichts anderes übrig, als ihm eine selbständige Stellung einzuräumen.

Damit entsteht der Zwischenton „fis“. Als weiterer Schritt wäre auf dieses fis ein halber Ton aufzusetzen. Bezogen auf das c erhalten wir die Frequenz $\frac{45}{32} \cdot \frac{16}{15} = \frac{3}{2}$, womit wir den bekannten Ton g erhalten, der unverändert aus der c-Leiter übernommen werden kann. So könnten wir mit Fleiß und Geduld weiterrechnen. Das nächste Bild zeigt das fertige Ergebnis.



Aus ihm geht hervor, daß sich gegenüber der c-Leiter ein etwas höheres a, dasselbe h und noch ein zweiter Zwischenton cis' ergeben haben.

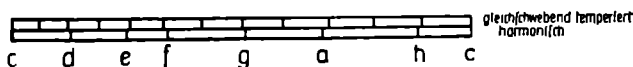
Die nächste Aufgabe wäre dann, die e-, f-, g- usw. Leiter zu konstruieren. Am Ende stünden wir ein wenig ratlos vor einer langen Liste von Zahlen, lauter neuen Tönen und Zwischentönen. Die hier gezeichnete Darstellung gibt ein Bild dessen, was bei dieser Arbeit für einige Tonleitern herauskommt.



Das Schema wird noch viel verwirrender, wenn man bedenkt, daß auch alle Zwischentöne Ausgangspunkte selbständiger Tonleitern sein müssen. All dies in ein einheitliches System zu bringen, erschiene einfach unmöglich, wenn nicht ein günstiger Umstand zu Hilfe käme. Wir sehen ja, daß viele Töne gruppenweise ziemlich nahe beieinander liegen, wie etwa die vorhin berechneten beiden, e und a. Eine geringe gegenseitige Verstimmung genügt daher, sie durch einen gemeinsamen Mittelton zu ersetzen. Es ist dann möglich, mit nur 5 Zwischentönen auszukommen. Auf jedem Klavier sind sie als schwarze Tasten schön zu sehen. Damit entsteht die 12stufige „chromatische Tonleiter“, die wir bereits betrachtet haben.

Eine besonders knifflige Frage ist allerdings, wie die chromatische Skala am besten gestimmt werden müsse, eine Arbeit, die man das „Temperieren“ nennt. Jeder Ton soll als Mittelwert mehrere Einzeltöne zusammenfassen, und doch sollen zugleich mög-

lichst viele Intervalle wirklich rein gestimmt sein. Der Streit um das vorteilhafteste Stimmsystem zieht sich durch die ganze Musikgeschichte. Es ist eine Geschichte der Kompromisse. Ein 12stufiges Tonsystem, das sämtliche Tonarten enthält und zugleich alle Intervalle völlig rein, ist mathematisch unmöglich. Es gibt nur einen radikalen Ausweg, wenn man allen vorkommenden Tonarten und Intervallen gleichermaßen gerecht werden will. Man muß sich von allen historischen Bedenken frei machen und die 12 Halbtonstufen innerhalb der Oktave gleichmäßig und mathematisch genau verteilen. Es ist die „gleichschwebend temperierte Stimmung“, mit der die chro-



matische Tonleiter ihren letzten Schliff erhielt. Da gibt es keine großen und kleinen Ganz- und Halbtöne mehr. Jeder Ton steht zum nächstfolgenden im genau gleichen Frequenzverhältnis. Was von früheren Systemen übrigblieb, sind allein die Oktaven. Nur diese werden streng harmonisch gestimmt. Ganz erklärlich auch; denn für diese reinste aller Konsonanzen ist unser Ohr am empfindlichsten.

Bezeichnen wir das Frequenzverhältnis je zweier Töne dieser neuen Leiter mit x , so muß nach 12 solcher Schritte das Verhältnis $\frac{2}{1}$ der Oktave zu ihrem Grundton erreicht werden, kurzum, es muß $x^{12} = 2$ sein, wonach sich $x = \sqrt[12]{2}$ ergibt. Mit einer Logarithmentafel läßt sich das leicht ausrechnen. Wir erhalten den Zahlenwert 1,0595 . . .

Nur eine kleine Probe soll zeigen, wie weit die auf neue Art temperierte Stimmung von der rein harmonischen abweicht. Eine Quinte, das sind sieben aufeinanderfolgende Halbtöne der chromatischen Tonleiter, wie wir auf dem letzten Bild leicht abzählen können. Siebenmal nacheinander multipliziert beträgt das gesamte Frequenzverhältnis $1,0595^7 = 1,498$. Die reinste harmonische Quinte fordert dagegen 1,5. Der Unterschied ist in der Tat so winzig, daß er mit dem Gehör kaum noch festgestellt werden kann. Selbst musikalisch verwöhnte Gemüter können damit zufrieden sein. Verständlich ist daher die Begeisterung, mit der sich Johann Sebastian Bach der neuartigen Stimmung des Klaviers widmete. Unvergleichlich ist sein „Wohltemperiertes Klavier“, jene einzigartige Sammlung von Präludien und Fugen, welche den ganzen Zirkel aller Dur- und Molltonleitern umfaßt. Sie steht als unvergängliches Denkmal von klassischer Schönheit am Ende einer langen Entwicklung.

Den Anfang hatte Pythagoras gemacht, der da glaubte, alle musikalischen Harmonien mit den Zahlen 1, 2 und 3 bewältigen zu können. Am Ende unseres Weges steht die exakte Tonleiter mit einem von Ton zu Ton gleichen Verhältnis der Schwingungszahlen von $\sqrt[12]{2}$. Was für eine Zahl ist das? Es gibt viele Wurzel ausdrücke, wie beispielsweise die Quadratwurzel aus 4, d. h. $\sqrt{4} = 2$, die ohne weiteres mit einem glatten Ergebnis aufgehen, also eine „rationale“ Zahl liefern. Denn rational nennt der Mathematiker alle Größen, die sich in ganzen Zahlen oder wiederum ganzen Bruchteilen davon ausdrücken lassen. Dies war der Glaube der Griechen, daß

eben alle Gesetzmäßigkeit dermaßen rational sein müsse. Wir wissen aber, daß die meisten Wurzel-
ausdrücke, wie etwa $\sqrt[3]{3} = 1,7321\dots$, nicht aufgehen.
Wir könnten rechnen noch und noch und kämen nie
damit zu Ende. Man erhält auch keinen Bruch, der
sich in ganzen Zahlen ausdrücken ließe. Die Qua-
dratwurzel aus 3 ist „irrational“, und ebenso die 12.
Wurzel aus 2.

Die Griechen des Altertums wußten um die Irratio-
nalität. War es nun Starrköpfigkeit oder Aberglaube



— die irrationale Zahl war ihrer Lehre Todfeind!
Sie paßte so wenig in ihren mystischen Zahlenkult,
daß sie geradezu mit einem Bannfluch belegt und
aus dem geheiligten Kreis ihres Denkens verwiesen
wurde. Eine alte Schrift berichtet sogar, daß „der
Mann, der zuerst die Betrachtung des Irrationalen
aus dem Verborgenen in die Öffentlichkeit brachte,
durch einen Schiffbruch umgekommen sei. Und zwar
deshalb, weil das Unausprechliche und Bildlose

immer verborgen hätte bleiben sollen.“ Bildlos waren nach ihrer Meinung das Chaos, die Urtiefen und der Ursprung des Daseins. Mochte von ewigen Fluten der Frevler verschlungen werden, der es wagte, hieran menschliches Maß anzulegen!

Nun, weder die moderne Mathematik noch die Meisterwerke unserer großen Komponisten haben durch den Gebrauch des Irrationalen Schiffbruch erlitten. Im Gegenteil, wir kämen heute selbst bei ganz einfachen physikalischen und technischen Berechnungen in die peinlichste Verlegenheit, wenn man uns die Benutzung irrationaler Zahlen verbieten wollte!

PIANO UND FORTE — OBJEKTIV BETRACHTET

Frequenz und Tonhöhe beschreiben nur die qualitative Seite des Schalls. Ob ein bestimmter Ton laut erklingt oder leise, ist keine Frage der Frequenz. Der feine Gesang einer schwirrenden Mücke und die eherne Stimmgewalt einer Alarmsirene, beide können durchaus in gleicher Tonhöhe, mit gleicher Frequenz schwingen. Der Unterschied liegt in der Stärke des Schalls. Gewiß, es lassen sich Worte finden, man kann von einem hauchzarten Pianissimo sprechen, von Mezzoforte und für das größtmögliche Fortissimo ein dreifaches *fff* hinschreiben. Das mag für den Musiker ausreichen. Damit ist hinlänglich ausgedrückt, was seine Instrumente herzugeben vermögen. Letzten Endes sind es aber nur Spielvorschriften für fertig gelieferte Klangerzeuger. Der Unterschied zwischen dem Forte einer Blockflöte und einer Jazztrompete läßt sich indes auf keinem Notenblatt wiedergeben, mit Worten und Symbolen ist da nichts ausgerichtet. Man muß das eben gehört haben und damit basta!

Dem Physiker aber läßt das Problem keine Ruhe. Sein Reich verlangt Maß, Zahl und Gesetz. Die in der Gefühlswelt empfindsamer Ohren und in der musikalischen Zeichensprache geltenden Begriffe sind für ihn zwar nicht völlig wertlos, aber doch

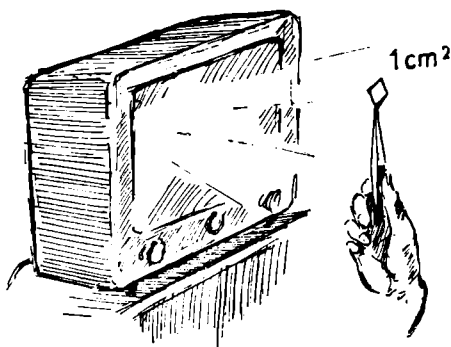
nur Hinweise, daß hier nach objektiv gültigen Beziehungen gesucht werden muß. Objektiv gültig, d. h. unabhängig von der lyrischen Auffassung der Klavierlehrerin Mia Moll, ohne Rücksicht darauf, wie die persönlichen Gehörnerven auf die gegen das Trommelfell prallenden Schallwellen reagieren.

Die Aufgabe scheint schwierig zu sein. Gewichte kann man zur Not mit der eigenen Muskelkraft vergleichend abschätzen. Gefühl und objektive Wertung liegen hier eng beieinander. Die physikalischen Begriffe von Geschwindigkeit und Beschleunigung lassen sich mit Bandmaß und Stoppuhr anschaulich begreifen. Will man aber Vorgänge und Kräfte im Schallfeld erfassen, so sieht man nichts, und die Hand tastet ins Leere.

Schallwellen sind rasch dahineilende, geringfügige Verdichtungen und Verdünnungen der Luft, davon haben wir gesprochen. Es müssen also im Schallfeld gewisse, im Takte der Frequenz aufeinanderfolgende Druckschwankungen der Luft feststellbar sein. Diese nach oben und unten auftretenden Abweichungen vom normalen Druck der Luft nennt man den „Schalldruck“. Wäre das Barometer an der Wand empfindlich genug, sein Zeiger müßte unter dem Einfluß des Schalldruckes zittern, wenn man hineinsingt. Aber davon kann bei diesem groben Gerät keine Rede sein. Immerhin kann der Schalldruck in Großlautsprechern zu solcher Größe anwachsen, daß zwar nicht gleich die Wände wackeln, aber die Stoffverkleidung der Membran sichtbar zu flattern beginnt.

Es gibt noch andere Möglichkeiten, die Intensität des Schalls objektiv auszudrücken. Damit Mikrofon und Trommelfell in Schwingungen geraten sollen, muß

ihnen Energie zugeführt werden; denn ohne Arbeitsaufwand ist keine Bewegung möglich. Vermittler dieser Energie ist das Schallfeld, das sie von der Schallquelle empfängt. Nur ein äußerst bescheidener Bruchteil gelangt zum Trommelfell. Es ist wie mit dem Licht einer Glühlampe, deren Energie auf dem Umweg über den Raum und dieses bedruckte Papier erst ins Auge gelangt. Versetzen wir uns in Gedanken in den von Schallwellen durchfluteten Raum, so wird eine große Fläche viel mehr Schallenergie auffangen als eine kleine. Um die Stärke des Schalls in einem bestimmten Punkt des Raumes zu kennzeichnen, muß man daher angeben, welche Energie in einer Sekunde auf die Flächeneinheit auftrifft. Da man bekanntlich die in der Sekunde verrichtete Arbeit als „Leistung“ bezeichnet, ergibt sich als Maß der „Schallstärke“ eine Leistung je Quadratcentimeter. Akustische Leistungen kann man aber heute, zum Beispiel mit dem Lautsprecher, leicht auf elektrischem Wege erzeugen. So kommt es, daß man die Schallstärke in Watt pro Quadratcentimeter (W/cm^2) anzugeben pflegt. Um es noch einmal zu betonen:



damit ist nicht die gesamte Leistung gemeint, die von der Schallquelle erzeugt wird, sondern nur die an einer bestimmten Stelle des Raumes, etwa in einem Konzertsaal oder zwischen zwei sich unterhaltenden Menschen, herrschende Intensität des Schalls.

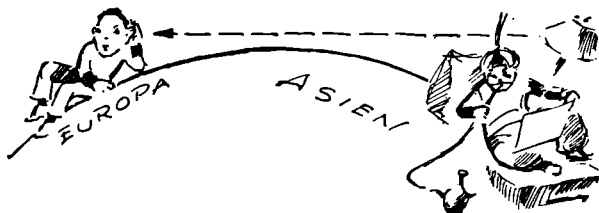
Die dem menschlichen Ohr dargebotenen akustischen Leistungen lassen sich aber nicht im entferntesten mit derjenigen vergleichen, die etwa eine Glühbirne in den Raum strahlt.

Auf unserem Schreibtisch steht eine 40-Watt-Lampe und verbreitet ein angenehmes und freundliches Licht. Im Abstand von einem Meter kann man noch bequem lesen und schreiben. Auf eine Fläche von einem Quadratcentimeter, das ist ungefähr die Größe einer Rabattmarke, fällt jedoch nur ein sehr kleiner Bruchteil der Gesamtleistung, etwa 0,003 Watt oder anders ausgedrückt, 3000 Mikrowatt (millionstel Watt oder μW). Stehen wir mit dieser Rabattmarke 10 Meter entfernt von der Lampe, so fällt es schon schwer, das Stückchen Papier noch zu erkennen. Nur noch 30 μW fängt es auf. Wir vergrößern den Lampenabstand auf 100 m. Erst nach längerem Gewöhnen an die Dunkelheit können wir uns herumtappend noch von ungefähr zurechtfinden. Die Marke empfängt noch einen Schimmer von 0,3 μW , aber ist sie bei dieser schwachen Beleuchtung überhaupt noch zu finden? In der Entfernung von einem Kilometer ist es vollends aus. Die Finsternis hat die Rabattmarke verschluckt. Sie bekommt zwar noch 0,003 μW zugestrahlt. Aber was macht das schon aus, für unser Auge ist sie verschwunden.

Auf solch mikroskopische Energiemengen und noch viel kleinere ist aber unser Ohr angewiesen. Wenn

sich zwei Menschen normal unterhalten, tun sie das mit einer Schallstärke von $0,0001 \mu \text{ W/cm}^2$. Ein wahrhaft winziger physikalischer Aufwand, wenn man bedenkt, welch unheimliche Folgen ein solches Gespräch im Leben haben kann! Der 38 Mann starke Gesangsverein „Harmonie“ schafft es nach intensivstem Training auf ganze $0,04 \mu \text{ W/cm}^2$. Nicht eben viel, wenn man den beträchtlichen Aufwand an Kraft in Betracht zieht.

Nun ist das aber längst kein Maßstab dafür, was das Ohr überhaupt zu leisten vermag, Man halte in einem absolut ruhigen Raum die Taschenuhr ans Ohr. Sie tickt leise, aber immerhin deutlich vernehmbar. Wenn man die Uhr allmählich vom Ohr entfernt, wird das Geräusch immer schwächer, um bei einem bestimmten Abstand schließlich ganz zu verschwinden. Mit dieser, bei aller Konzentration eben noch vernehmbaren Schallstärke ist die untere „Hörschwelle“ erreicht. Sie liegt bei etwa $10^{-10} \mu \text{ W/cm}^2$, ein zehnmilliardstel von einem millionstel Watt je Quadratzentimeter! Kann man sich ein Bild davon machen, was das heißt? Wir wollen es versuchen.



Der Maharadscha von Lahore im Indien zündet seine Leselampe an. Ihr Schein dringt durchs offene Fenster hinaus in die Nacht. Die Energie der Strahlung macht sich auf den Weg und verteilt sich mit zuneh-

mender Entfernung auf eine ungeheure Fläche. Quer durch ganz Asien würde der Schimmer der Lampe dringen, wenn die Erde nicht gekrümmt wäre und keine die Strahlung verschluckende Atmosphäre hätte. Eine unvorstellbar winzige Spur der Strahlung gelangte bis zu uns nach Europa und „beleuchtete“ hier die Fläche einer Rabattmarke mit etwa 10^{-10} $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Diese, in Schall umgerechnete Energiemenge würde ausreichen, das Ohr zu erregen. Die Leistung des Ohres ist in der Tat märchenhaft und wertvoller als der Reichtum aller Maharadschas zusammengenommen.

Noch empfindlicher dürfte das Ohr kaum sein. Wir würden zwar nicht gleich das Gras wachsen hören, wohl aber ein dauerndes Rauschen vernehmen, hervorgerufen durch die nie aufhörende Bewegung der Luftmoleküle. Bis herab zum Rauschpegel der Molekularbewegung reicht das Feingefühl des Gehörs, mehr kann man einfach nicht verlangen.

Im Verhältnis dazu liegt das stärkste noch erträgliche Geräusch bei $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Eine weitere Steigerung der Schallstärke würde dem zarten Bau des Ohres schaden. Er reagiert dann sehr einfach mit einem Schmerz. Man soll froh darüber sein, daß es dann weh tut; denn es ist zu unserem Schutz; der Schmerz zwingt uns, den ungastlichen Ort schleunigst zu verlassen. Doch nicht genug damit! Im Mittelohr befinden sich, durch ein Gelenk miteinander verbunden, die beiden Knöchelchen „Hammer und Amboß“. Sie übertragen die Schallenergie vom Trommelfell auf die zarten Organe des inneren Ohres. Beim Erreichen der „Schmerzgrenze“ knickt das Gelenk seitlich aus und bewahrt wie eine automatische Sicherung das Ohr vor groben Schäden.

WAS IST EIN PHON?

Im „Goldenen Anker“ ist Hochbetrieb. Ein halbes Dutzend Trompeten schmettert in den Saal, der Pianist bearbeitet seinen Flügel, und der Mann am Schlagzeug haut auf die Pauke, daß die Bühne wackelt. Nur schreiend können sich die Gäste des Stiftungsfestes unterhalten, dreihundert ausgelassene Kehlen tun ihr Möglichstes. Der Lärm dringt in alle Winkel, bis weit auf die Straße tönt der fröhliche Tumult.

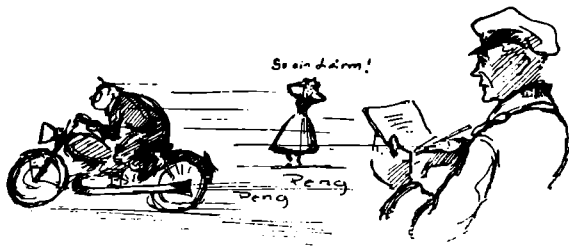
„Verbieten müßte man so etwas“, stöhnt Herr Meier in seinem Bett, der zwei Häuser weiter wohnt, „überhaupt verklagen müßte man den Staat wegen Duldung öffentlichen Ärgernisses! Füllt sich sein Säckel mit Vergnügungssteuer, Biersteuer, Umsatzsteuer und was weiß ich noch, derweilen ich zusehen kann, wie ich zu meinem Schlaf komme!“ Er dreht sich auf die andere Seite. „Lärmkontrollapparate müßte die Polizei haben, mit einem dicken roten Strich auf der Skala — und wehe dem, der dann noch zuviel Krach macht!“

Hat Herr Meier nicht recht? Gewiß, zumindest moralisch. Das Problem läßt ihm keine Ruhe. Er ist sehr konsequent und nimmt sich fest vor, die Sache weiter zu verfolgen.

Am nächsten Morgen ist er beim Polizeirevier und bringt sein Anliegen vor. Der diensttuende Wacht-

meister hat freundlich zugehört. „Geräuschmesser? Oh, die haben wir schon lange. Wenn Sie mal sehen wollen?“ Der Wandschrank im Nebenzimmer steht halb offen. Man sieht da ein zusammengeschobenes Stativ liegen, aufgerolltes Gummikabel, einen polierten Holzkasten. „Aber in Ihrem Fall können wir Ihnen leider nicht dienen. Für uns ist die Polizeistunde maßgebend, und Sie sagten ja selbst, daß nach ein Uhr Ruhe war.“ Der Ärger von Herrn Meier hatte inzwischen einer gelinden Neugier Platz gemacht. „Ja, aber wozu brauchen Sie dann diesen Apparat überhaupt?“ — „Ooch, nur so manchmal, wissen Sie? Es ist nämlich wegen dem Straßenlärm. Sind Sie etwa Kraftfahrer?“ Geräuschmesser — Kraftfahrer, eine Ideenverbindung begann sich bei Meiern anzubahnen. „Ja schon, aber nur Motorrad“, meinte er etwas vorsichtig. „Na, da müßten Sie doch eigentlich Bescheid wissen“, und damit angelte der Polizist ein gelbes abgegriffenes Büchlein aus der Brusttasche.

„Sehen Sie hier — nein hier ist der § 49 Absatz 1 der Straßenverkehrszulassungsordnung. Da heißt es: Das Fahrgeräusch eines Kraftfahrzeuges darf 85 Phon nicht übersteigen, zu messen in 7 m Abstand usw. usw.“ — „Dunnerkiel“, entfuhr es Meier, „da muß man ja verflixt aufpassen!“ Er hatte zwar keine



rechte Vorstellung, was „85 Phon“ bedeuten sollte. Im stillen dachte er aber an das mächtige Geknatter seiner eigenen Maschine, aus der er zur Leistungssteigerung kürzlich den Schalldämpfer herausgeschraubt hatte, wen ging das etwas an? Doch wie leicht konnte so ein heimtückischer Phonmesser dahinterkommen! So empfahl er sich, dem Zufall ob dieses Hinweises dankbar. Es war noch einmal gut gegangen.

Um ganz sicher zu gehen, schlug er zu Hause im Lexikon unter „Phon“ nach. Und da stand es: „Phon — Maß der physiologisch empfundenen Lautstärke von Geräuschen.“ Darunter war eine kleine Tabelle:

Hörschwelle	0 Phon
Flüstern, Uhr ticken	10 „
Blätterrauschen	20 „
Ruhige Straße	30 „
Leises Radio	40 „
Umgangssprache	50 „
Bürolärm	60 „
Lauter Straßenlärm	70 „
Schreien	80 „
Preßluftbohrer	90 „
Kesselschmiede	100 „
Flugzeug in 4 m Entfernung	120 „
Schmerzgrenze	130 „

Es konkurrieren zwei Begriffe miteinander: „Schallstärke und Lautstärke“. In zwei verschiedenen Maßeinheiten ausgedrückt offenbar ein und dasselbe? Der Praktiker arbeitet lieber mit der leicht einprägsamen Phonskala; die in Mikrowatt je Flächeneinheit angegebene Schallstärke ist für die wissenschaftliche

Forschung besser geeignet. Darauf kommt es jedoch weniger an. Der Kern der Sache liegt tiefer.

Die Schallstärke ist ein physikalisches Maß, sie mißt die in den Schallwellen enthaltene Energie mit Hilfe von Apparaten, die selbst ein Tauber mühelos bedienen kann. Vollkommen objektiv und ohne jedes Gefühl, wie man Gewichte auf einer feinen Waage bestimmt.

Lautstärke aber ist etwas durch und durch Subjektives. Sie gibt nämlich an, welche Empfindung die gegen das Ohr treffenden Schallwellen auslösen. In drei Schritten geht es vor sich: auf einen physikalischen Vorgang im Außenraum folgt ein physiologischer Prozeß im Gehörorgan und hierauf das, was wir „Hören“ nennen. Am Anfang der Reihe steht der physikalisch meßbare Reiz, am Ende die wahrgenommene Empfindung. Beide sind untrennbar miteinander verkoppelt wie Ursache und Wirkung. Aber wie sieht dieser Zusammenhang aus?

Im Seminarraum des physiologischen Universitätsinstitutes sitzt erwartungsvoll ein Dutzend Studenten. Stud. phil. Höfer hat heute das Referat: „Wie Ihnen aus der Vorlesung von Prof. Schmidt bekannt sein dürfte, ist das psychophysische Grundgesetz besonders bei der Gesichts-, Gehörs- und Druckempfindung experimentell leicht nachzuweisen. Um Ihnen insbesondere die hierbei angewandte Methode der Minimaländerungen zu zeigen, werden wir jetzt hier eine kleine Versuchsreihe durchführen. Jeder von Ihnen wird an die Reihe kommen. Die rechnerische Auswertung nehmen wir das nächste Mal vor. Darf ich als ersten Herrn Müller bitten?“ Dieser erhob sich, trat herzu, und Höfer verband ihm die Augen. Er wurde gebeten, die rechte Hand leicht auszustrek-

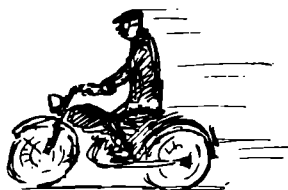
ken. Darauf legte sein Studienkollege ein kleines mit Stoff gepolstertes Brettchen, 100 Gramm schwer. „So, schön, und nun wollen sie uns bitte sagen, in welchem Augenblick ich ein Gewicht auf das Brett lege.“ Höfer entnahm einem Kästchen ein Grammgewicht und legte es vorsichtig auf das Brettchen. Man sah Müller an, wie er, mit angespannten Sinnen die Schwere seiner Hand prüfend, diese gleichsam auf und ab bewegte. Er hatte nichts gemerkt. Höfer nahm das Gewicht vorsichtig mit der Pinzette weg



und legte dafür ein 2-Gramm-Stück auf. Die Stoffpolsterung ließ keine Geräusche entstehen, sein Kollege blieb still. Er ersetzte es durch ein 3-Gramm-Stück. Erst beim nächsten Schritt, bei 4 Gramm zusätzlicher Belastung rief Müller: „Halt, ich glaube, Sie haben jetzt was draufgelegt.“ Er konnte natürlich keine Ahnung haben, wieviel es gewesen sein mochte. Aber alle übrigen waren Zeugen. Die „Unterschiedsschwelle“ des Druckgefühls betrug 4 Gramm oder 4% der vorhandenen Belastung. Nun bekam Müller ein 200 Gramm schweres Brettchen auf die Hand, und Höfer begann von vorn. Dieses Mal blieb Müller beim 4-Grammgewicht stumm. Auch bei 5,

6 und 7 Gramm empfand er offenbar nichts. Erst bei 8 Gramm hellten sich seine Züge auf: „Ja, jetzt spüre ich wieder, daß etwas dazukam.“

Obwohl der Absolutbetrag dieses Mal das Doppelte betrug, war die Unterschiedsschwelle wieder 4⁰/. Als beim dritten Versuch Höfer die Grundlage auf 300 Gramm erhöhte und Müller erst das 12. Gramm bemerkte, ergaben sich daraus wieder 4⁰/. So ging es weiter. Dann kam der nächste an die Reihe. Nach zwei Stunden war das Experiment zu Ende. Nicht alle hatten in gleicher Weise reagiert. Des einen Hand



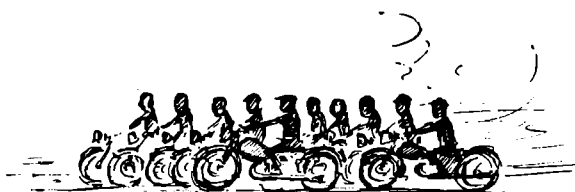
1 Motorrad = 85 phon

war mehr, die des andern weniger empfindsam. Aber trotzdem stand unzweifelhaft fest: jeder eben noch wahrnehmbare Unterschied in der Empfindung war ein stets gleichbleibender Bruchteil von dem, was an Gewicht auf der Hand lag.

Wenn man ähnliche Versuche mit dem Gehör anstellt, findet sich dasselbe Gesetz. Nur muß hier die Stärke des einwirkenden Schalls nicht um 4⁰/, sondern um etwa 26⁰/ des schon vorhandenen Wertes zunehmen. Ein Unterschied in der Lautstärke ist erst festzustellen, wenn die Schallstärke auf das 1,26fache anwächst. Man sagt dann, die Lautstärke habe um 1 Phon zugenommen. Damit ein Geräusch um 10

Phon lauter wird, muß der Schall 10 mal nacheinander um diesen Faktor anwachsen. Das ergibt $1,26 \times 1,26 \times 1,26 \dots$ oder kurz das $1,26^{10}$ fache. Das auszurechnen macht wenig Mühe. Man muß die Zahl 1,26 zehnmal nacheinander multiplizieren und erhält als Ergebnis die Zahl 10. Mit anderen Worten: wenn irgendeine gegebene Schallstärke auf den zehnfachen Wert anwächst, nimmt die Lautstärke nur um 10 Phon-Einheiten zu.

Nun ergibt sich ein recht sonderbares Verhältnis zwischen Schallstärke und Lautstärke. Ein von der



10 Motorräder = 95 phon

Polizei gerade noch geduldetes Motorrad gibt im vorschriftsmäßigen Abstand eine Schallstärke von $0,03 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Das sind 85 Phon. Zehn solcher Motorräder ergeben selbstverständlich auch die 10fache Schallstärke, mithin $0,3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Die Lautstärke dieser Versammlung knatternder Vehikel beträgt aber nicht etwa 850 Phon, sondern nur $85 + 10 = 95$ Phon! Soll die Lautstärke um 20 Phon zunehmen, so setzt das voraus, daß die Schallstärke auf das $1,26^{20}$ oder ausgerechnet auf das 100fache anwächst. Hundert Motorräder müßten zu gleicher Zeit starten, wenn die Lautstärke von 85 auf 105 Phon zunehmen soll. Und würde man die Motoren aller 1000 Fahrzeuge

einer großen Stadt auf einem engen Platz Probe laufen lassen, so gäbe das erst 115 Phon.

Wer ein wenig in der Mathematik Bescheid weiß, dem wird hier etwas einfallen. Die Zahlenreihe 10, 100, 1000 . . . entspricht den Logarithmen 1, 2, 3 . . ., die entsprechenden Phon-Zahlen betragen 10, 20, 30 . . ., die Lautstärken verhalten sich demnach zueinander wie die Logarithmen der Schallstärken. Unser Gehör übersetzt also die physikalisch gegebenen Schallstärken in ihre Logarithmen. Ein Nachteil oder eine Verfälschung des wahren Schallbildes? Im Gegenteil, eine wunderbare Vereinfachung! Das Ohr steht ja vor der Aufgabe, einen riesenhaften Umfang von Schallstärken zu bewältigen. Das schwächste noch wahrnehmbare Geräusch von $10^{-10} \mu\text{W}/\text{cm}^2$ verhält sich zum eben noch erträglichen von $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ wie 1:10 Billionen oder wie $1:10^{13}$. Die logarithmische Empfindlichkeit des Ohres ist die eleganteste Lösung, diesen gewaltigen Zahlenraum übersichtlich aufzugliedern.

Unser Beispiel mit den dröhnenden Motoren mag den Eindruck erwecken, daß unser Gehör recht unempfindlich wäre. Es ist aber zu bedenken, daß die niedrigsten Schallstärken außerordentlich schwach sind. Die ersten 20 Stufen der Phonskala bewegen sich zwischen den Werten 10^{-10} und $10^{-8} \mu\text{W}/\text{cm}^2$. Bei ganz leisen Geräuschen nehmen die Schallstärken je Phon daher nur um sehr kleine Beträge zu. Gegen das obere Ende der Skala hin wächst die Schallstärke in Riesenschritten.

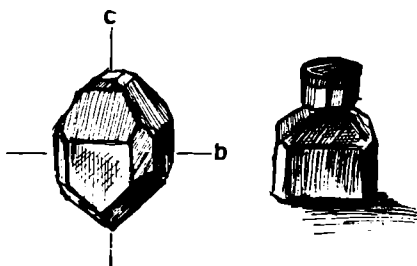
Gerade diese Einteilung entspricht den natürlichen Gegebenheiten am besten, denen unsere Vorfahren einmal ausgesetzt waren. Schutzlos, mit unterentwickeltem Gebiß und schwächlichen Gliedmaßen war

der Urmensch der Wildnis preisgegeben. Das schwächste Geräusch eines im Unterholz anschleichenden Feindes konnte seinen Tod bedeuten. Wie ein scheues Tier und stets sprungbereit zu schneller Flucht, war er auf ein sehr feines Gehör angewiesen. Große Schallstärken dagegen haben für ein in der freien Natur lebendes Wesen nur geringe biologische Bedeutung. Das Gehör nimmt sie nur in sehr groben Abstufungen auf. Mögen sich die Lebensgewohnheiten inzwischen auch gewandelt haben, das Gehör des Urmenschen blieb uns erhalten.

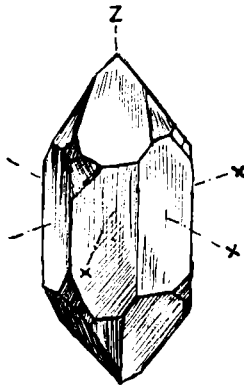
DER SINGENDE KRISTALL

Die letzte Jahrhundertwende war der Anfang eines neuen Zeitalters. Die Welt der Atome wurde erobert. Unter den Pionieren ragt das Forscherehepaar Pierre und Marie Curie besonders hervor. Mit der Auffindung des Radiums und seiner Eigenschaften haben sie Neuland entdeckt und haben es auch erschlossen. Das allein würde genügen, Pierre Curies Namen unsterblich zu machen. Nur selten denkt man aber daran, daß derselbe Curie, ein ungewöhnlich bescheidener Mensch von hervorragender Vielseitigkeit, auch noch anderes geleistet hat. Obwohl er nie eine Schule besucht hatte, machte er bereits als einundzwanzigjähriger junger Mann zusammen mit seinem Bruder Jacques seine erste große Entdeckung. Dabei handelte es sich um die elektrischen Eigenschaften gewisser Kristalle. Natürlich sind die Kristalle als Ganzes ebensowenig elektrisch wie jeder andere harmlose Stein. Die beiden Brüder fanden aber, daß die Endflächen einzelner Kristalltypen sich elektrisch aufladen, wenn man sie in einer bestimmten Richtung zusammendrückt. Es besteht eine entfernte Ähnlichkeit mit einem nassen Schwamm, aus dem beim Zusammendrücken das Wasser herausquillt. Beim Nachlassen des Druckes verschwindet die Ladung wieder. Man nennt diese Erscheinung den „piezoelektrischen Effekt“.

Pierre war nicht durch Zufall darauf gekommen. Er wußte, daß viele Kristalle eine oder auch mehrere „polare Achsen“ haben. Um zu verstehen, was damit gemeint ist, sehen wir uns den hier abgebildeten Kristall (Kieselzinkerz) an. Sein oberes Ende ist abgeflacht, unten läuft er spitz zu. In diese Richtung kann man sich eine Achse (c) hineingelegt denken. Vorderes und hinteres Ende sind nicht vertauschbar, die Achse ist „polar“. Die andere Achse (b) ist dagegen nicht polar, ihr vorderes Ende ist dem andern gleich-

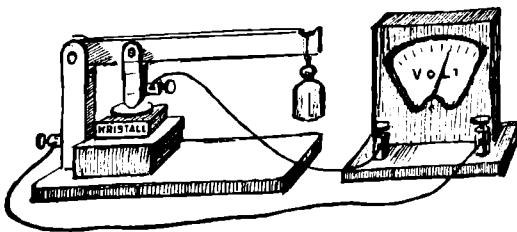


wertig. Das sieht man, wenn der Kristall um die c-Achse gedreht wird. Nach einer 180° -Drehung kommt der ganze Kristall wieder mit sich selbst zur Deckung. Wir können uns das mit einem viereckigen Tintenfaß anschaulich machen. Mittendurch, vom Boden bis zum Stöpsel, hat das Tintenfaß eine polare Achse, dagegen sind die quer durch die Seitenflächen gehenden Achsen nicht polar. Beim Quarz, der für viele Zwecke besonders geeignet ist, finden wir drei polare Achsen. Die auf unserem Bild senkrecht stehende Achse (c) ist im Gegensatz zum ersten Beispiel nicht polar; der Kristall kommt mit sich zu vollkommener Deckung, wenn man ihn auf den Kopf stellt. Dafür sind die drei mit x bezeichneten Achsen polar, was



an den abwechselnd verteilten, kleinen abgeschrägten Ecken liegt.

Nach ihren ersten Versuchen fanden Pierre und Jacques, daß es vorteilhaft sei, nicht den ganzen Kristall unter Druck zu setzen, sondern mehr oder weniger dicke Platten herauszuschneiden, so daß die Hauptfläche dabei senkrecht zur polaren Achse liegt. Den Kristallklotz klemmten sie zwischen zwei Metallplatten, die mit einem empfindlichen Meßinstrument verbunden waren. Wurde die Kristallplatte durch ein Gewicht zusammengepreßt, so zeigten sich auf den Endflächen positive oder negative Ladungen.

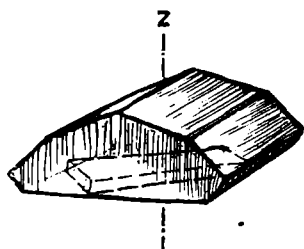


Die Spannung beträgt zwar einige Volt, doch sind die Elektrizitätsmengen außerordentlich gering. Man hätte sie niemals messen können, wenn nicht Pierre das besonders hochempfindliche „Curie-Elektrometer“ erfunden hätte, das ihm übrigens auch bei seinen späteren Untersuchungen der radioaktiven Strahlen wertvolle Dienste leistete.

Wozu läßt sich die Entdeckung praktisch auswerten? Nun, es gibt Kristalle, deren Piezoeffekt bedeutend stärker ist als der des Quarzes. Da ist das Seignettesalz. Einstmals führte es als „Natrium-Kalium tartaricum“ ein nur bescheidenes Apothekendasein. Dem Heilkundigen war es als gelindes Abführmittel von salzig kühlendem Geschmack bekannt. Als man seine piezoelektrischen Fähigkeiten erkannte, die den Quarz um das 150fache übertreffen, gewann es eine neue Bedeutung. Leider sind seine Kristalle nicht sehr fest und verwittern leicht in warmer Luft. Dafür lassen sie sich leicht in jeder gewünschten Größe künstlich züchten. Wie der Kristall aussieht, zeigt unser nächstes Bild, das erkennen läßt, wie die polare Achse läuft und wie die Platte herausgeschnitten werden muß. Man bevorzugt dabei schräg orientierte Platten oder Leisten. Oft setzt man zwei solcher Kristallstäbe der Länge nach zusammen und klemmt sie mit dem einen Ende fest ein. Wird dann das freie Ende nach oben oder unten gebogen, so entstehen elektrische Spannungen, die sich leicht verstärken lassen.

Der Seignettesalzkristall hat zwei wichtige Anwendungen in der modernen Akustik gefunden. Verbindet man das freie Ende der Doppelleiste mit einer Stahlnadel, so entsteht daraus der piezoelektrische Tonabnehmer. Die in den Tonrillen der Schallplatte

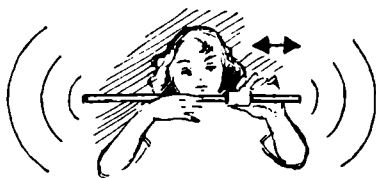
gleitende Nadel überträgt ihre Schwingungen auf den Kristall. Dieser formt sie in Spannungsschwankungen um und gibt sie an einen Verstärker und Lautsprecher weiter. Dabei entwickelt er den großen Vorzug, daß er völlig verzerrungsfrei arbeitet und darum Musik und Sprache besonders gut wiedergibt. Nicht minder wertvolle Dienste leistet das piezoelektrische Mikrophon. Hier werden die Metallplatten zu einer Membran zusammengesetzt. Die gegen die Fläche treffenden Schallwellen, so gering ihre verbiegende Kraft auch sein mag, genügen bereits, die



akustischen Schwingungen in elektrische Impulse umzuformen.

Die beiden Curies suchten weiter. Es mußte möglich sein, den piezoelektrischen Effekt umzukehren, ähnlich wie bei einer Dynamomaschine, die einen elektrischen Strom hervorbringt, wenn man sie bewegt, und die sich zu drehen beginnt, sobald man ihr elektrischen Strom zuführt. Ursache und Wirkung lassen sich übrigens auch bei vielen anderen physikalischen Effekten miteinander vertauschen. Nach längerem Probieren fanden die Brüder ihre Erwartungen bestätigt. Sie klemmten einen Quarzblock zwischen zwei Metallplatten ein, von denen die obere positiv,

die andere negativ geladen wurde. Der Kristall zog sich dann in Richtung des elektrischen Feldes zusammen. Beim Vertauschen der Pole dehnte er sich ein wenig aus. Schwierig war es nur, die Dickenänderung nachzuweisen, da sie selbst bei Spannungen von mehreren tausend Volt äußerst geringfügig ist. Damit war der „reziproke piezoelektrische Effekt“ gefunden. Hätten die Curies den Seignettesalz-Kristall näher gekannt, wäre ihnen viel Mühe erspart geblieben. Der einseitig eingeklemmte Doppelstab nämlich verbiegt sich bereits bei einer Spannung von etwa 100 Volt so sehr, daß man es mit dem bloßen Auge sehen kann.



LAUTLOSER SCHALL

Wir halten einen langen Glasstab in der Mitte fest und reiben die eine der beiden Hälften mit einem ausgehöhlten, nassen Korke. Ein durchdringender, quietschender Ton entsteht. Es klingt nicht besonders angenehm. Wir sollten schon wissen, wie die Schwingungen zustande kommen. Der Kork gleitet reibend am Glas entlang und bleibt in kurzen Zeitabständen ein wenig daran haften, macht sich wieder frei, haftet von neuem und versetzt den Stab dadurch in Längsschwingungen. Das Glas ist elastisch; der Stab läßt sich mit einer langen ausgespannten Schraubenfeder vergleichen. Auch diese kann in ihrer Längsrichtung federnd schwingen, indem sie sich in rascher Aufeinanderfolge zusammenzieht und ausdehnt.

Nehmen wir einen kürzeren Stab, so wird der Ton noch höher. Die Eigenfrequenz ist um so größer, je kleiner der Stab ist. Bei einer Länge von etwa fünfzehn Zentimetern und darunter geschieht aber etwas

Seltsames: Trotz eifrigem Reiben entsteht kein hörbarer Ton mehr. Daß der Glasstab dennoch schwingt, daran ist aber nicht zu zweifeln. Wir brauchen nur einen Hund herbeizuholen. Kaum beginnen wir zu reiben, so fängt dieser je nach Temperament an, aufgeregt zu bellen oder zu jaulen. Wo unser Ohr den Dienst versagt, reicht das des Hundes ein ganzes Stück weiter.

Sein Gehör reicht bis 100 000 Hz; wir hören nur bis



zu 20 000 Hz. Das führte zur Erfindung der „Hundepfeife“. Je kürzer eine Pfeife ist, desto höher ist der von ihr hervorgebrachte Ton. Ein Vetter des berühmten Charles Darwin, der Forschungsreisende und Biologe Francis Galton, hatte ein solches Instrumentchen gebastelt, mit dem er die obere Hörgrenze des Menschen ermittelte. Als man dahinterkam, wie die Galtonpfeife auf den Hund einwirkt, verwandte man sie zum Abrichten von Jagd- und Polizeihunden. Niemand hört etwas davon, nur der gehorsame Hund vernimmt die lautlose Stimme seines Herrn.

Frequenzen über 20 000 Hz bezeichnet man als „Ul-

traschall“. Zunächst möchte man wohl glauben, daß abgesehen von der Kuriosität der Unhörbarkeit, nichts Besonderes zu erwarten wäre. Aber die Physiker haben sich an die Arbeit gemacht und zuerst einmal kräftige Ultraschall-Generatoren hergestellt. Welchen Weg man dabei zu gehen hat, zeigt unser Glasstab. Verkürzen wir ihn in Gedanken immer weiter, so muß seine Eigenfrequenz ständig größer werden, so daß selbst ein Hund nichts mehr davon hört. So schrumpft der Stab schließlich zu einer dünnen Scheibe zusammen. Ihn mit einem nassen Korke zum Schwingen anzuregen, geht dann allerdings nicht mehr. Vielmehr spinnt die Ultraschalltechnik jetzt den Gedanken weiter, den die Brüder Curie begonnen hatten. Man nimmt eine Quarzscheibe, klemmt sie zwischen zwei Metallplatten und führt ihnen eine hochfrequente Wechselspannung zu, die gerade der Eigenfrequenz der Scheibe entspricht. Solche Schwingungen lassen sich ja mit Elektronenröhren ohne weiteres erzeugen. Der Quarz fängt dann an, sich abwechselnd zusammenzuziehen und auszudehnen. Er verwandelt die elektrischen Schwingungen in Ultraschall.

Da man die Dicke des Schwingquarzes nach Belieben wählen kann, lassen sich mit Leichtigkeit Frequenzen von 20 000 bis zu mehreren Millionen Hz erzeugen. Noch höhere Schwingungszahlen bis zu einer Milliarde Hz gewinnt man durch Ausnutzen der Oberschwingungen; denn in dieser Hinsicht verhält sich der Quarz wie eine schwingende Saite. Ein Schwingquarz strahlt den Ultraschall mit außerordentlicher Kraft ab. Wir erinnern uns dessen, daß die größte, eben noch erträgliche Schallstärke bei $1000 \mu \text{W/cm}^2$ liegt. Mit der zum Schwingen erregten

Quarzplatte lassen sich in Flüssigkeiten ohne Schwierigkeiten Ultraschallstärken von 40 W/cm^2 erzeugen, das ist 40 000mal mehr als der brüllende Lärm eines Flugzeugmotors darstellt.

Heute werden Ultraschallerzeuger als gebrauchsfertige Apparate von der Industrie geliefert. Es gehört dazu ein Gerät, das zunächst die elektrischen Schwingungen abgibt. Ein biegsames Kabel führt heraus und endet im eigentlichen Schallkopf, der den Schwingquarz enthält. Damit lassen sich nun die interessantesten Versuche anstellen. Setzt man den Schallkopf auf den Boden eines Wasserbeckens, so schießt aus der gegenüberliegenden Oberfläche ein kleiner Springbrunnen heraus. Der Druck des Schallstrahls läßt einen Sprudel entstehen. Im verdunkelten Raum heben sich die Stellen besonderer Energieanhäufung durch eine schwache Leuchterscheinung ab. Das von den starken Schwingungen durchwirbelte Wasser erwärmt sich. Öl und Wasser, zwei Flüssigkeiten, die sich sonst nicht mischen lassen, verwandeln sich in eine feine, haltbare Emulsion. Viele Bakterien vertragen die Erschütterungen nicht und werden abgetötet. Man kann deshalb mit Ultraschall Milch auf kaltem Wege in wenigen Sekunden sterilisieren. Typhusbazillen werden zu Tode vibriert und zertrümmert. Größere Tiere, wie Fische, Frösche, und Kaulquappen, werden gelähmt oder getötet. Die flüssigen Schmelzen von Metallen erstarren im Feld des Ultraschalls besonders feinkörnig, man kann sogar Aluminium mit Blei legieren. Aus einem alten, in Seifenwasser schwimmenden Fetzen Stoff fällt der Schmutz von selbst heraus. Die Ultraschall-Waschmaschine schont das Gewebe.

Formt man die Oberfläche des Schallkopfes zu einem

Hohlspiegel, so sammelt sich die ganze Energie in einem Brennpunkt, wo die Schallstärke mehrere tausend Watt/cm² erreichen kann. Der Schall frißt sich dann in das härteste Material hinein und bohrt Löcher selbst in den Diamant. Hier macht man sich die starke Richtwirkung des Schwingquarzes zunutze. Die Länge der Ultraschallwellen beträgt bei einer Frequenz von einer Million Hz im Wasser nur etwa 1,5 Millimeter. Sie ist also wesentlich kleiner als der strahlende Körper selbst. Der Schall breitet sich dann nicht mehr allseitig und kugelförmig aus, wie wir das beim hörbaren Schall beschrieben haben, sondern eilt als ein enges Strahlenbündel senkrecht zur schwingenden Oberfläche davon. Diese starke Richtwirkung macht den Ultraschall besonders für das Echolot geeignet, von dem wir schon berichtet haben. Da der Vorgang völlig lautlos vor sich geht, ist das Prinzip des Echolotes beispielsweise zur Suche nach feindlichen U-Booten verwendet worden.

Ebenso wie von festen Wänden wird der Ultraschall von kleinen Luftbläschen im Wasser zurückgeworfen. Die von einer großen Masse von Fischen aufsteigenden Luftbläschen geben daher ein ausgezeichnetes Echo. Der moderne Heringsfänger kann nicht nur den Aufenthaltsort seiner Beute aufspüren, sondern auch deren Umfang abschätzen. Auch von kleinen Hohlräumen und Spalten in festem Material wird der Ultraschall reflektiert. Man kann auf diese Weise Rohmaterial und fertige Werkstücke selbst von sehr großen Abmessungen mit Schallstrahlen durchleuchten. Haarrisse von einem Millionstel Millimeter machen sich noch deutlich bemerkbar, wo die bisher üblich gewesene Röntgenuntersuchung versagt.

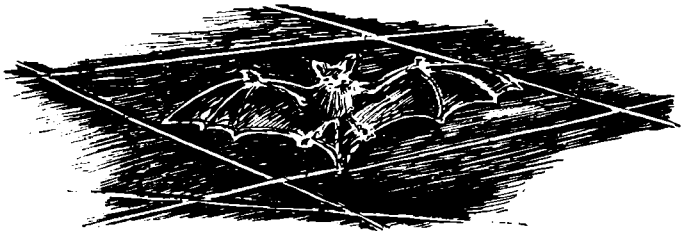
Für Mediziner und Biologen stellt der Ultraschall ein sehr aussichtsreiches Betätigungsfeld in Aussicht, da die Strahlung tief in den Körper eindringt und die verschiedensten Wirkungen auslöst. Alle nur möglichen Anwendungsgebiete des Ultraschalls erschöpfend zu beschreiben, würde Bände füllen. Man kann nur ahnen, was an nützlichen und interessanten Dingen noch der Entdeckung harret.

DAS GEHEIMNIS DER FLEDERMAUS

Wer mit offenen Augen die Natur durchstreift, für den gibt es immer neue Überraschungen. Oft glaubt man, mit einer neuen physikalischen Entdeckung etwas unerhört Einzigartiges gefunden zu haben, und findet dann eines Tages, daß irgendein bescheidenes Tierlein die Einrichtung in vollkommenstem Maße schon besitzt und verwendet. In einem einzigen Grashalm steckt mehr chemische Kunst als in allen chemischen Instituten zusammengenommen; der schwirrende Flug einer Mücke gibt dem Ingenieur mehr aerodynamische Probleme auf als ein moderner Hubschrauber. Im lebenden Wesen, der aufs höchste organisierten Materie, sind die Gesetze der Natur in der kunstvollsten Weise verwirklicht. Wir aber kommen nur schrittweise dahinter, wie alles zusammenhängt und sich erklären läßt.

Zu den seltsamsten und interessantesten Lebewesen gehören die Fledermäuse, kleine, meist insektenfressende Säugetiere mit verkümmerten Äuglein und häutigen Schwingen. Sie leben ihr bescheidenes Dasein in alten Türmen und Gemäuern, in hohlen Bäumen und verlassenen Bergwerken. Tagsüber hängen sie als unscheinbare, graue Bündel zusammengefaltet verkehrt herum an der Decke oder scheinen an den Wänden zu kleben. Mit dem Sinken

des Tages aber kommt Leben in die kleinen Körper. Sie lassen sich fallen, breiten die Flügel aus und flattern durch die Luke hinaus in die Abendluft. Gespenstig wirkt ihr geräuschloser Flug, gewandt sich jagend huschen sie schattenhaft hin und her. Manchmal hört man sie zwitschernd pfeifen, mitunter auch seltsame, leise schnarrende Geräusche. So geistern sie die ganze Nacht herum. Nicht etwa nur zum Vergnügen, sondern vor allem beruflich; denn mit ihrem kleinen zahnbewaffneten Maul fangen sie zielsicher — man bedenke: im Finstern —, was sich an nahrhafter Kost in der Luft herumtreibt.



Sogar in absoluter Dunkelheit finden sie sich mit unfehlbarer Sicherheit zurecht. Kreuz und quer durch einen völlig fensterlosen Raum kann man dünne Fäden spannen. Eine darin herumflatternde Fledermaus berührt nicht einen einzigen! Die kleinen, schwach entwickelten Augen hätten hier ohnehin keinen Zweck. Das Tierchen muß geradezu im Besitz eines sechsten Sinnes sein. Schon vor mehr als 150 Jahren haben sich die Gelehrten mit dieser rätselhaften Gabe der Fledermaus beschäftigt und auch schon etwas Wichtiges herausgefunden. Eine Fledermaus, der man die Ohren verschließt, verliert die Fähigkeit, Hindernisse im Dunkeln wahrzuneh-

men. Was die Ohren aber eigentlich damit zu tun hatten, ließ sich nicht ergründen. Der schemenhaft lautlose Flug verriet keinerlei Geräusch, das einen Hinweis hätte geben können. Alles, was man damals dazu zu sagen hatte, klang wie die Antwort eines Schülers, der in der Biologie nicht aufgepaßt hat: die Fledermäuse können „mit den Ohren sehen“.

Man kam erst im Jahre 1938 hinter das Geheimnis, als es technisch möglich war, auf elektrischem Wege Ultraschall in hörbare Töne umzuwandeln. Das von der Fledermaus bereits bekannte schrille Zwitschern ist gewissermaßen nur ihre Umgangssprache im gegenseitigen Verkehr. Zur Orientierung im dunklen Raum aber erzeugt sie kurzzeitige Ultraschall-Impulse mit einer Frequenz von 30 bis 120000 Hz. Wie sie das zuwege bringt, läßt sich wohl erklären. Der Kehlkopf ist, wie übrigens bei vielen anderen Tieren, eine Art Pfeife, durch welche die Atemluft gepreßt wird. Die Fledermaus vermag diesen Luftstrom mittels eines Verschlusses zu stauen und periodisch wieder freizugeben. Die explosionsartig entweichende Luft bläst dann die Kehlkopf-pfeife mit großer Gewalt an. Der Schalldruck beträgt mehr als das Doppelte einer voll arbeitenden Kesselschmiede, für das nur 8 Gramm wiegende Tier eine wahre Riesenleistung! Zugleich ist das Gehör als Ultraschallempfänger ausgebildet.

Wozu der ganze Aufwand dient, läßt sich aus dem Verhalten der Fledermaus schließen. Ein Tier, das sich zum Abflug anschickt, dreht den Kopf mit weit geöffnetem Maul und leicht zitternden Kiefern lebhaft hin und her. Zweifellos sendet es dabei kräftige Schallimpulse nach allen Richtungen des Raumes. Es tastet ihn mit seinen Schallstrahlen ab;

denn die Fledermaus befindet sich ja in der gleichen Lage, als ob wir von der Falltür aus in ein unbekanntes Kellergewölbe hinabsteigen wollten. Mißtrauisch, wie jeder Vorsichtige einmal ist, untersuchen wir das dunkle Verlies erst mit der Taschenlampe, ehe wir den Abstieg riskieren. An den gegenüberliegenden Wänden oder anderen Hindernissen werden die Schallimpulse der Fledermaus wie Lichtstrahlen reflektiert und mit einer der Laufzeit des Schalls entsprechenden Verzögerung vom Ohr aufgenommen. Hiernach verschafft sich die Fledermaus einen ungefähren Überblick über die Lage. Erst dann, wenn sie darüber „im Bilde“ ist, fliegt sie ab. Damit ausgesandter Impuls und zurückkommender Reflex bei kleinen Entfernungen zeitlich auseinanderfallen, müssen die einzelnen Schallstöße sehr kurz sein. In der Sekunde gibt die Fledermaus je nach den Umständen 5 bis 20 Impulse ab, deren Zeitdauer selbst nur etwa 2 bis 3 Tausendstel Sekunden beträgt. Als Begleitgeräusch entsteht dabei das schon erwähnte leise Schnarren. Auch während des Fluges ist das Maul weit geöffnet; jetzt tastet die Fledermaus den ganzen vor ihr liegenden Luftraum akustisch ab und spürt dabei die nahrhafte Beute auf. Doch eine Reihe der bedrohten Insekten hat inzwischen auch gelernt. Vor allem die dickbäuchigen Eulen und Spinner haben in ihrem Körper auffallend große Hörorgane versteckt und ergreifen bei der Einwirkung von Ultraschall sofort die Flucht. Auffällig ist auch das dichte Haarkleid der meisten Nachtfalter. Wenn man aber daran denkt, daß Ultraschall von wolligen Stoffen kaum reflektiert wird, erkennt man dessen Sinn. Im Schutze der vorzüglichen Tarnung tauchen die Tierchen im Schallfeld

unter und sind von ihren Feinden nur noch schwer zu finden. Wo der Kampf ums Dasein tobt, läßt jede neue Angriffswaffe auch die zweckentsprechende Gegenwehr entstehen.

Die Fledermaus „sieht“ also tatsächlich mit den Ohren. In kurzer Zeit weiß sie, wie sich mit Dressurversuchen beweisen ließ, über alle Einzelheiten eines von ihr bewohnten Raumes genau Bescheid. Seine Ecken und Winkel, die ganze Einrichtung hat sie genau im Gedächtnis. Mit der Sicherheit eines Schlafwandlers findet sie die Öffnung zu ihrem Käfig, stößt aber plump dagegen, wenn man ihn herumgedreht hat. Die Macht der Gewohnheit muß auch bei ihr mitunter schmerzhaft bezahlt werden. Weiche und wollige Stoffe verschlucken den Schall und reflektieren ihn nicht. Sie sind für die Fledermaus „unsichtbar“. Wenn aber das Tierchen dahinein gerät, kann auch nicht viel passieren. Der alte Volksglaube, daß Fledermäuse den Frauen in die Haare fliegen, mag schon recht haben; aber wer wird ihnen das höchstwahrscheinlich sehr selten vorkommende „Versehen“ schon übelnehmen wollen?

Es gibt zwei verschiedene Fledermaus-Familien, die „Glattnasen“ und die „Hufeisennasen“. Was soeben erzählt wurde, gilt für die Glattnasen, von denen man mehrere Arten kennt. Die Hufeisennasen haben ein merkwürdiges Gesicht. Ihre beiden Nasenlöcher sitzen am Grund eines schalenförmigen Reflektors, der wie ein kleiner Scheinwerfer die Schallstrahlen gebündelt in eine feste Richtung wirft. Der Schall kommt also nicht aus dem geöffneten Maul, sondern aus der Nase. Das ist aber nicht der einzige Unterschied. Die Einzelimpulse der Glattnasen sind sehr kurz und sind vom zurückkeh-

renden Echo sauber getrennt. Dagegen geben die Hufeisennasen dreißig bis vierzig Mal länger anhaltende Pfeiftöne von sich, die natürlich für uns unhörbar sind. Wir hatten nun schon ausgerechnet, daß bei einem Wandabstand von siebzehn Metern das Echo bereits nach $\frac{1}{10}$ Sekunde zurückkehrt. Wenn der Pfeifton selbst länger als $\frac{1}{10}$ Sekunde anhält, wird er sich bei den meist viel kleineren Entfernungen mit dem Echo überdecken. Darum kann nicht der Zeitabstand zwischen Impuls und Echo zur Entfernungs-



messung dienen; es läßt sich eher denken, daß diese Fledermäuse die Entfernung nach der Stärke des reflektierten Schalls abschätzen. Ob es sich aber wirklich so verhält, wird sich bei weiteren Untersuchungen erst noch zeigen müssen.

Nicht allein die Fledermäuse bedienen sich des unhörbaren Schalls. Unter den zahlreichen Arten von Heuschrecken, deren lebensfroher, zirpender Gesang uns den Sommer über erfreut, gibt es einen kleinen Grashüpfer mit Namen Conocephalus, der sehr starken Ultraschall aussendet. Sein Fiedelbogen ist

eine mit 125 Zähnchen besetzte Leiste an einem Flügel. Sechshundsechzig Mal in der Sekunde fährt er damit über eine harte Kante am anderen Flügel hin und her. Das ergibt eine hörbare Frequenz von $66 \times 125 = 8000$ Hz. Die Schwingungen werden aber von einer trommelartigen Membran aufgenommen, wobei eine Oberschwingung von 40000 Hz entsteht. Erstaunlich ist die Stimmgewalt des kleinen Knirpses. Im Abstand von dreißig Zentimetern entspräche sie einer Lautstärke von 90 Phon — wenn wir sie vernehmen könnten.

Auf der Suche nach weiteren solchen Tieren haben sich die Forscher mit Ultraschallempfängern in den afrikanischen Urwald begeben. Rätselhafte Laute von etwa 25 000 bis 30 000 Hz wurden dabei registriert.

In den Abendstunden waren sie am stärksten, gingen des Nachts zurück und verschwanden gegen Morgen wieder. Man weiß noch nicht, welches Wesen sie erzeugt. Noch hat der Urwald Geheimnisse, die er nicht verraten hat.

Und wenn sie erforscht sind, werden es nicht die letzten sein, die sich in der weiten Welt des Schalls auf tun und die es zu lösen gilt. Mit neuen Entdeckungen entstehen neue Probleme: aus neuen Erkenntnissen ergeben sich dann immer wieder Anwendungen, die der vorwärtsschreitenden Technik dienen und unser kulturelles Leben bereichern und schöner gestalten. Möchten wir unsere Nachkommen nicht darum beneiden?

STICHWORTVERZEICHNIS MIT ERLÄUTERUNGEN

		Seite
Basilarmembran	eine feine weiche Haut, welche die Schnecke des Innenohres der Länge nach durchzieht und die Gehörnerven trägt	14
Behm-Lot	Echolot zur Messung von Meerestiefen	63, 120
Chorton	Orgelton, früher zum Stimmen der Orgel gebräuchlich, um einen ganzen Ton höher als der Kammerton	22
Chromatische Tonleiter	12-stufige Tonleiter, die von Halbton zu Halbton gleichmäßig fortschreitet	19, 90
Curie, Pierre	(1859—1906) französischer Physiker, entdeckte zusammen mit seiner Frau Marie Curie das Radium	110
Diatonische Tonleiter	nach dem Prinzip größtmöglicher Harmonie aufgebaute Tonleiter, harmonische Tonleiter	84
Dissonanz	Mißklang, Zusammenklang mehrerer Töne von unangenehmer Gesamtwirkung	83
Edison, Thomas	(1847—1931) erfolgreicher und geschäftstüchtiger amerikanischer Erfinder	33
Formanten	vokalbildende Frequenzbereiche	42
Frequenz	(Wechselzahl) Anzahl der in einer Sekunde stattfindenden Schwingungen	11
Garcia, Manuel	(1805—1906) berühmter spanischer Gesangslehrer	38
Grammophon	Apparat zur Wiedergabe von Sprache und Musik mit rotierender Schallplatte und Seitenschrift	36
Grenzwinkel der Totalreflexion	Schallstrahlen können in eine Wand nur eindringen, wenn ihr Einfallswinkel kleiner als der Grenzwinkel ist	65

	Seite
Helmholtz, Hermann von (1821—1894) einer der bedeutendsten Physiker des 19. Jahrhunderts, der auch auf dem Gebiet der Akustik führend war	16, 26
Hertz, Heinrich (1857—1894) Entdecker der elektrischen Wellen. Ihm zu Ehren wird die Zahl der sekundlich stattfindenden Schwingungen mit Hz bezeichnet	11
Hörgrenze	11
untere H., die tiefste wahrnehmbare Frequenz von etwa 16 Hz	14
obere H., höchste wahrnehmbare Frequenz von etwa 20000 Hz	15
Hörschwelle	14
die geringste, vom Ohr wahrzunehmende Schallstärke	99
Inneres Ohr	14
enthält die Schnecke mit der Basilarmembran	14
Intervall	79
Abstand zwischen zwei Tönen der Tonleiter	79
Kammerton	22
Wiener K., zum Stimmen der Instrumente festgelegter Ton a^1 mit 435 Hz. Heute durch den Normstimmton mit 440 Hz ersetzt	22
Kehlkopf	40
Organ der menschlichen Stimme	40
Klang	26
Gesetzmäßig aufgebautes Tongemisch	26
Klangfarbe	28
entsteht durch das Zusammenwirken eines Grundtones mit seinen Obertönen	28
Klangspektrum	28
geordnete Darstellung eines Klanges, aus der die einzelnen Frequenzen und die Stärke der Teiltöne zu ersehen ist	28
Konsonanz	79
Wohlklang, Zusammenklang mehrerer Töne von angenehmer Gesamtwirkung	79
Laplace, Pierre (1749—1827) französischer Mathematiker und Astronom	51

		Seite
Lautstärke	die Stärke, mit der Schall gefühlsmäßig empfunden wird, gemessen in Phon	103
Longitudinalwellen	Längswellen, in denen die Teilchen in der Fortpflanzungsrichtung hin und her schwingen	54
Mittelohr	mittlerer Teil des Gehörorgans, der die Gehörknöchelchen Hammer, Amboß und Steigbügel enthält	14
Monochord	leichter Holzkasten mit einer darübergespannten Saite, deren schwingende Länge verändert werden kann	77
Newton, Isaac	(1643—1727) englischer Mathematiker, Physiker und Astronom, einer der größten Naturforscher aller Zeiten	49
Normstimmton	zum Stimmen der Instrumente heute verwendeter Ton a^1 mit 440 Hz	22
Obertöne	Begleiter des Grundtones, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache des Grundtones betragen	26
Periode	eine vollständige Schwingung	11
Phon	Maß der vom Gehör empfundenen Lautstärke	103
Phonograph	Apparat zur Wiedergabe von Sprache und Musik mit rotierender Walze und Tiefenschrift	34
Piezoelektrischer Effekt	auf den Endflächen gewisser Kristalle und Kristallplatten entstehen unter Druck elektrische Ladungen	110
Pythagoras	(um 580—495 v. u. Z.) griechischer Philosoph und Mathematiker	76
pythagoreische Tonleiter	eine Tonleiter, die ausschließlich aus Quinten und Oktaven konstruiert ist	81
polare Achse	Kristallachse, deren vorderes und hinteres Ende nicht vertauschbar sind	111

		Seite
Reflexion	Zurückwerfung des Schalls an Wänden und anderen Hindernissen, Echo	61
Resonanz	Mitschwingen eines Körpers unter dem Einfluß eines anderen, wenn beide dieselbe Eigenfrequenz haben	16
Schalldruck	Abweichung des Luftdruckes von seinem normalen Wert innerhalb des Schallfeldes	96
Schallfeld	allgemeine Bezeichnung für den von den Schallwellen durchfluteten Raum	54, 96
Schallgeschwindigkeit	in der Luft bei 0° C 331,6 m/sec in der Luft bei 14° C 340 m/sec in Wasser 1440 m/sec	51
Schallstärke	die je Sekunde auf eine Fläche von 1 cm ² auftretende Schallenergie, ausgedrückt in Mikrowatt (μ W/cm ²)	97
Schallstrahl	gedachte Linie in Richtung der Schallausbreitung	60
Schallwellen	aufeinanderfolgende Verdichtungen und Verdünnungen der Luft	54
Schallwellenwiderstand	eine in der wissenschaftlichen Akustik benutzte Größe: das Produkt aus Dichte und Schallgeschwindigkeit in dem betroffenen Körper	65
Schmerzgrenze	größte, noch erträgliche Schallstärke	100
Schwingquarz	zwischen zwei Metallplatten eingeklemmte Quarzplatte, die durch elektrische Schwingungen angeregt wird	118
Seismik	Methode zur Erkundung unterirdischer Bodenschichten mit Hilfe von Schallwellen	71
Seismometer	Apparat zur Messung von Erschütterungen	71

		Seite
Sinuskurve	Schwingungsform aller elastisch schwingenden Körper, zugleich grafische Darstellung des Sinus eines stetig veränderlichen Winkels	22
Stellknorpel	durch Muskelzug verstellbare Knorpelteile am vorderen Teil des Kehlkopfes, deren Bewegung die Stimmbänder spannt	40
Temperieren	Ausgleichen eines Tonsystems durch geringfügiges Verstimmen der Einzeltöne	90
Tonkennzeit	kürzeste, zur Erkennung eines Tones notwendige Zeit	18
Tonleiter	Aufeinanderfolge der in der Musik verwendeten Töne	19
	chromatische Tonleiter	90
	diatonische Tonleiter	84
	gleichschwebend temperierte Tonleiter	91
Transponieren	pythagoreische Tonleiter	81
	Umsetzen einer gegebenen Melodie von einer Tonart in eine andere	21, 88
Transversalwellen	Querwellen, in denen die Teilchen quer zur Fortpflanzungsrichtung schwingen	56
Ultraschall	Schall von einer Frequenz über 20000 Hz	118
Unterschiedsschwelle	der kleinste den Sinnen wahrnehmbare Unterschied zweier Reize	105
Voder	elektrisches Gerät zur Nachahmung der menschlichen Stimme	45
Vokaldreieck	Übersicht der Vokale, deren Anordnung insbesondere die Formanten erkennen läßt	43
Wellenlänge	Entfernung von einem Wellenberg oder einem Wellental zum nächsten	57

Im gleichen Verlag sind erschienen:

Margot Abt

WASSER, NICHTS ALS WASSER

Mit 4 farbigen Tafeln und 11 Federzeichnungen von Kurt Riedel

2. Auflage, 104 Seiten, Halbleinen DM 3,50

Die Autorin erzählt vom Wasser, von seinen Eigenschaften, seinem Wert für die Produktion und für die Lebenshaltung des Menschen und von wissenschaftlichen und technischen Maßnahmen zu seiner Erforschung und Ausnutzung. Lebendig dargeboten, wird der Jugend sehr ernsthaftes Wissen über Grundwasser, Wasserhaushalt, Abwässer, Wasserbiologie und Wasserchemie und die Notwendigkeit einer Wasserplanung vermittelt.

Helmut Stapf

ERZ WIRD STAHL

Mit 72 Abbildungen auf Tafeln und 22 technischen Zeichnungen

2. Auflage, 124 Seiten, Halbleinen DM 4,80

Auf stählernen Schienen brausen die Züge dahin und verbinden Stadt und Land, verbinden die Völker. Überall, wohin wir blicken, begegnen wir dem Werkstoff Stahl. Überall, wo wir aufbauen, brauchen wir ihn in den verschiedensten Formen. Kein Wunder also, daß dem Aufbau der Eisen- und Stahlindustrie bei uns ganz besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Vom Weg, den das Eisenerz nimmt, um als Stahl dem Menschen zu dienen, erzählt dieses Buch.

Helmut Stapf

BAUMEISTER KALK

Mit 4 farbigen Tafeln von Hans Happach, 36 einfarbigen Abbildungen und 20 Zeichnungen im Text

120 Seiten, Halbleinen DM 4,80

Von dem natürlichen und dem künstlichen Kalkkreislauf, von den Baustoffen, die beim Hausbau Verwendung finden, von ihrer Gewinnung, ihrer Verarbeitung und den chemischen Vorgängen, die dabei eine Rolle spielen, erzählt dieses zum Teil naturkundliche, zum Teil technische Jugendbuch.

Walter Illing

LANGER WEG ZUR KURZEN WELLE

*Mit 4 farbigen Tafeln von Kurt Schuster und
13 technischen Zeichnungen von Günther Hartmann
112 Seiten, Halbleinen DM 4,80*

Ein Nachrichtenfachmann berichtet nach einem Überblick über die Entwicklung des Nachrichtenwesens bis zur Anwendung der Elektrizität von den erregenden Fortschritten, die die Nachrichtentechnik in den letzten hundert Jahren genommen hat.

D. Naliwkin und L. Petrow

ERDÖL

*Mit 4 farbigen Tafeln und Federzeichnungen
von Lieselotte Finke-Poser
124 Seiten, Halbleinen DM 4,80*

Die Verfasser berichten von der Entstehung, der Gewinnung und Nutzung des Erdöls, besonders der sowjetischen Quellen. Den jungen Leser werden vor allem die neuen Bohr- und Gewinnungsmethoden interessieren, deren Darstellung sich spannend wie ein Roman liest.

Helmut Stapf

SALZ ÜBERALL

*Mit 4 farbigen Tafeln von Hans Happach, 40 Abbildungen auf Tafeln
und 25 Federzeichnungen
120 Seiten, Halbleinen mit Schutzumschlag DM 4,80*

Der Autor beginnt mit einer Schilderung, wie die Salzlager entstanden sind, berichtet von der Gewinnung des Salzes, von seiner Bedeutung im Haushalt des Menschen und im Haushalt der Natur, macht uns am Schluß seines Buches mit den vielfachen Industrien bekannt, für die Salze den Grundstoff liefern, und läßt uns die Bedeutung für unsere Wirtschaft erkennen. Die eindrucksvollen Fotos, zur Verfügung gestellt vom Ministerium für Schwerindustrie, zeigen nochmals einen lückenlosen Produktionsablauf.

